



GRAFENO: BIOGRAFÍA DE UN MATERIAL

Trabajo Fin de Grado en Filosofía; Departamento de Historia de la Ciencia, UNED

Descripción breve

El presente documento relata el largo camino hacia el grafeno. Así como algunas de sus propiedades, problemas y aspecto socio-económico. La lectura está enfocada para cualquier persona que esté interesada en el grafeno, independientemente de sus conocimientos científicos.

Autor: Mario Amor García
mario.grafeno.tfg@gmail.com

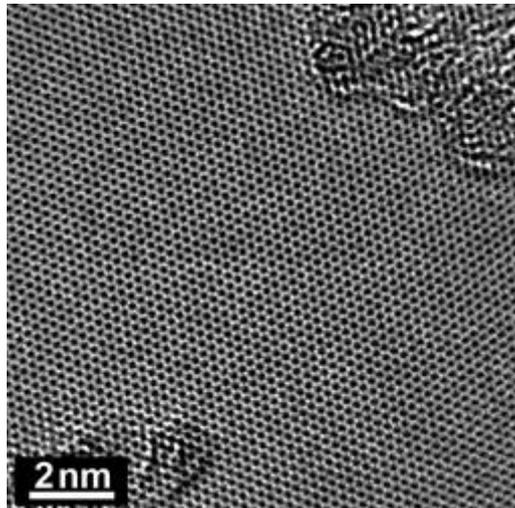


Imagen de una lámina de grafeno obtenida por un microscopio electrónico de transmisión. Fuente: Universidad Técnica de Dinamarca

ÍNDICE

Primera parte:

Introducción	3
Alótropos del carbono	5
¿Qué es el grafeno?	10

Segunda parte:

La larga historia del grafeno	13
2004: El año del grafeno	24
Problemas del grafeno	32

Tercera parte:

Aspecto socio-económico	37
Grafeno en España	42

<i>Epílogo</i>	45
-----------------------------	----

<i>Agradecimientos</i>	46
-------------------------------------	----

El grafeno es uno de los llamados “nuevos materiales”¹ que vienen a construir la tecnología del mañana. Llamamos “grafeno” a un alótropo² del carbono caracterizado por ser una única capa de átomos de carbono organizados en forma hexagonal. Su nombre fue dado por **H.P. Boehm** y su equipo³ en 1986, en el que combinaron la palabra “grafito” y el sufijo –“eno” que refiere a los hidrocarburos aromáticos policíclicos⁴. Aunque su aislamiento y estudio fueron realizados en 2004 por Andre Geim y Konstantin Novoselov—galardonados en 2010 con el Premio Nobel en Física por ello—su recorrido es largo como veremos en el presente trabajo.

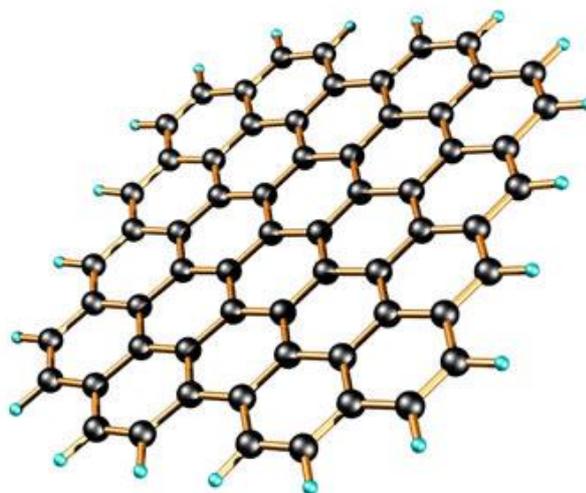


Figura 1. Lámina de grafeno. Imagen de Ernesto Oyervides Muñoz y Catalina Pérez Berumen Artículo sobre el grafeno en *Cienciacierta* N° 24

¿Qué es el carbono?

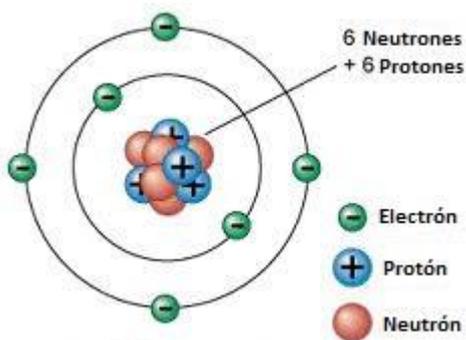


Figura 2. Átomo de carbono

Llamamos “carbono” a un átomo formado por 6 protones, 6 neutrones y 6 electrones. Como tiene 6 protones, ocupa el sexto lugar en la Tabla Periódica. La masa del carbono es de 12.0111 u (Unidades de masa atómica unificada o Da, Dalton). Debido a que este átomo cuenta con 6 protones y 6 neutrones, es llamado carbono-12 (¹²C) y se trata del isótopo⁵ de carbono más abundante en la Tierra con una presencia de más del 98%, seguido del carbono-

¹ En referencia a los nanomateriales. Esto es, materiales modificados a escala nanométrica. Es decir, la mil millonésima parte de un metro.

² Llamamos *alotropía* a la propiedad que poseen ciertos elementos químicos de aparecer con diferentes estructuras moleculares.

³ GEIM Andre, “Graphene prehistory”: *Physica Scripta*. Y BOEHM H. P., SETTON R. y STUMPP E. 1986 *Carbon* **24** 241.

⁴ Se denomina *hidrocarburos aromáticos policíclicos* a la unión de anillos aromáticos. Siendo éstos una propiedad química en la que los electrones del enlace doble (Pi) circulan libremente de un enlace a otro, dotando a la molécula de mayor estabilidad. Un ejemplo es el benceno, cuya configuración circular hace que los electrones del enlace Pi se desplacen circularmente por encima y por debajo de la molécula.

⁵ Se denomina *isótopo* a un átomo que pertenece a un mismo elemento químico, pero varía en su número de neutrones. Por lo que también varía en su masa atómica.

13 (6 protones y 7 neutrones) 1.07% Aprox. Y trazas de carbono-14 (6 protones y 8 neutrones)⁶

Como curiosidad, podemos mencionar que el carbono representa el 0.5% de la Vía Láctea⁷, es el cuarto elemento más abundante de la galaxia⁸ (ver figura 3) y es la base de todas las formas de vida conocidas⁹.

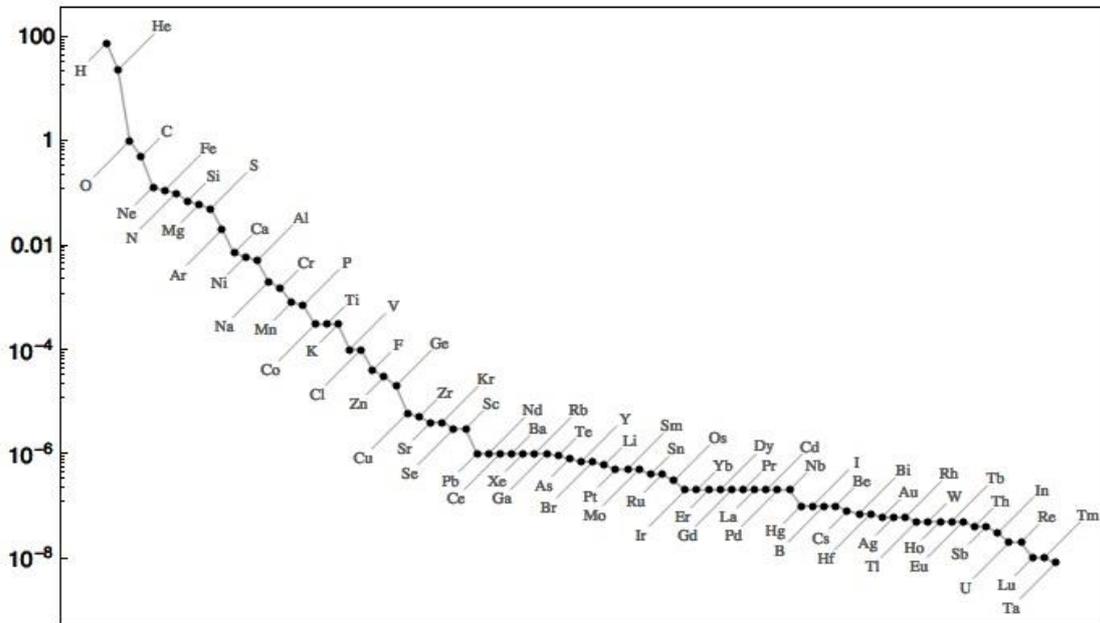


Figura 3. El carbono ocupa el cuarto lugar, siendo el hidrógeno el elemento más abundante (Alrededor de un 75 por ciento). Tabla extraída de <http://periodictable.com/Properties/A/UniverseAbundance.html>

⁶ Ver “Tabla de masa isotópica y abundancia natural”. Datos: K.J.R. Rosman, P.D.P. Taylor *Pure Appl. Chem.* 1999, 71, 1593-1607.

⁷ CROSWELL, Ken. *The Alchemy of Heavens.* 1996.

⁸ El carbono se forma en el interior de las estrellas, en un proceso conocido como “proceso Triple Alfa”, en el que tres átomos de helio, sin sus electrones, se fusionan.

⁹ Esto es debido a que en el carbono se facilita el doble y triple enlace, algo básico para la bioquímica.

ALÓTROPOS DEL CARBONO

Como hemos mencionado anteriormente, el carbono es uno de los elementos químicos que presenta alotropía. El alótropo más conocido es el **grafito**, el cual consta de varias monocapas de carbono organizado en forma hexagonal y unidas por fuerzas de Van der Waals.¹⁰ Dicho alótropo lo podemos encontrar en un objeto tan cotidiano como un lápiz¹¹.

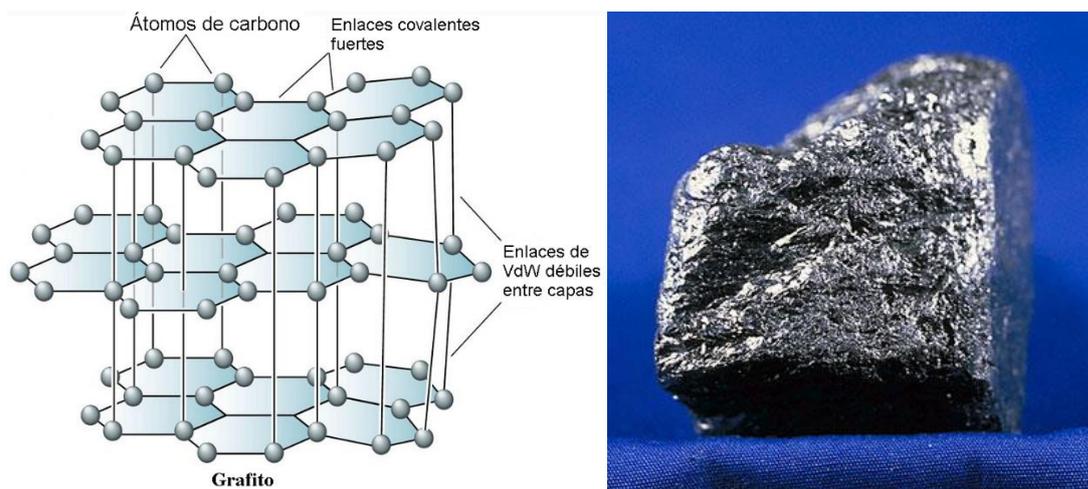


Figura 4. Izquierda: Estructura del grafito Derecha: Mineral de grafito. Fotografía de <http://marianamoradoquimica.blogspot.com.es> y Wikipedia respectivamente

Como se puede apreciar en la figura 4 izquierda, el grafito está compuesto de varias capas de grafeno unidas entre sí por las Fuerzas de Van der Waals. De hecho, si se dejasen apiladas varias capas de grafeno, éstas terminarían formando grafito. Siendo éste un importante problema para el manejo del grafeno.¹² La distancia entre las distintas capas es de aproximadamente 3.3 Angstroms (\AA)¹³. Esta configuración la hace idónea para la intercalación¹⁴. La intercalación es un tema antiguo que ha vuelto a despertar interés en la actualidad con la nanotecnología y los nanomateriales. La intercalación de grafito fue descubierta por primera vez en 1840 por el Dr. C.

¹⁰ Las fuerzas de Van der Waals son las fuerzas atractivas o repulsivas entre moléculas debido a sus dipolos. Las salamandras se sirven de estas fuerzas para adherirse a las distintas superficies.

¹¹ Salvo por algunos pueblos del sur-este de Europa, el grafito era desconocido hasta mediados del siglo XVI. Por esas fechas se descubrió grafito (lo llamaban "plumbago"), en Cumberland (Inglaterra). Y no fue hasta 1779 cuando el químico sueco Carl Scheele mostró que ese material era carbono. Una década más tarde, el geólogo Abraham G. Werner propuso llamarlo "grafito" (de la palabra griega "escribir") en vez de "plumbago". Como curiosidad podemos mencionar que este material fue tan valioso que Inglaterra prohibió exportarlo a Francia en las Guerras Napoleónicas por tener un valor militar. Ver GEIM Andre y KIM Philip. "Carbon Wonderland". *Scientific American*. Abril 2008

¹² MERTENS Ron, *The Graphene Handbook*. 2016.

¹³ Un Angstrom equivale a la diez mil millonésima parte de un metro. Esta unidad es empleada para expresar longitudes de onda muy pequeñas, distancias moleculares, atómicas, etc.

¹⁴ En química, la intercalación consiste en introducir una o varias moléculas entre otras dos o grupo de ellas. Un ejemplo es el ADN.

Schafhäütl, quien observó la formación de "grafito azul" tras la reacción con ácido sulfúrico y agentes oxidantes.¹⁵

Aparte de escribir, el grafito era utilizado como lubricante y para la fabricación de objetos como casquillos. De hecho, esta versatilidad fue lo que le puso en el punto de mira de científicos e ingenieros durante más de ciento cincuenta años como veremos más adelante.

Otro alótropo del carbono es el **diamante**, cuya estructura le otorga una dureza formidable y cuya belleza le confiere gran valor económico.

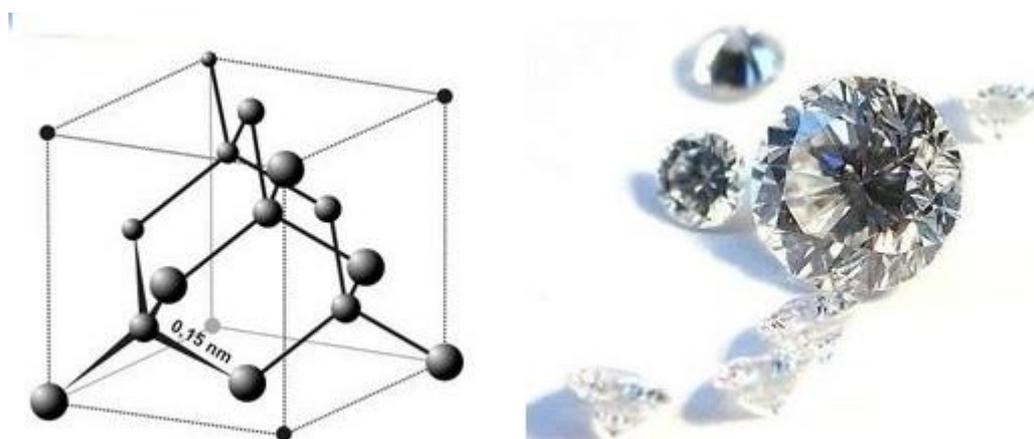


Figura 5. Izquierda: Estructura del diamante. Derecha: Diamante pulido. Imágenes obtenidas de Wikipedia.

Hasta que en 1985 se descubrieron y sintetizaron los "fullerenos"¹⁶, se creía que en la naturaleza sólo se podría encontrar carbono puro en dos formas alotrópicas: Grafito y diamante. Sin embargo, en 1985 los químicos americanos Robert Curl y Richard E. Smalley, junto al británico Harry Kroto, hicieron incidir un láser sobre una lámina de grafito y obtuvieron formaciones esféricas compuestas de carbono¹⁷. Tales formas fueron conocidas como "Buckyballs" o "Buckybolas". Pero este fullereno esférico no sólo se podía sintetizar, sino que el telescopio Spitzer de la NASA apuntó cerca de las estrellas "XX Ophiuchi" (a una distancia de 6.500 años-luz de la Tierra) y los investigadores descubrieron un elevado número (se podrían formar 10.000 montes Everest) de diminutas partículas sólidas que resultaron ser moléculas C₆₀.¹⁸ En donde se hace referencia a 60 átomos de carbono. Ver figura 6.

Pero la buckybola C₆₀ no es la única, también podemos encontrar la C₇₀, la C₄₈ o C₃₄ como algunos ejemplos a mencionar, siendo la C₂₀ la más pequeña. Las buckybolas vienen a ser materiales de cero dimensiones o 0-D.¹⁹

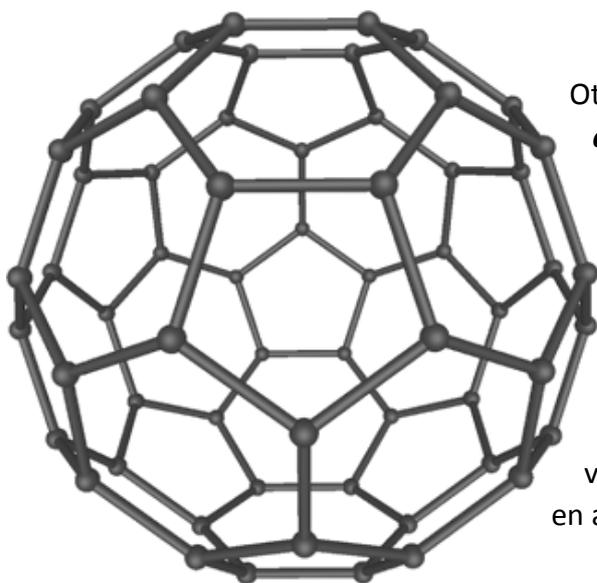
¹⁵ "Non-oxidative intercalation and exfoliation of graphite" by Brønsted acids Nina I. Kovtyukhova, Yuanxi Wang, Ayse Berkdemir, Rodolfo Cruz-Silva, Mauricio Terrones, Vincent H. Crespi and Thomas E. Mallouk. **Nature**.

¹⁶ En honor al arquitecto e ingeniero americano Richard Buckmisters Fuller, quien previamente había investigado teóricamente el carbono en formas esféricas y cilíndricas.

¹⁷ ACOSTA, Antonio J.: *La nanotecnología*. RBA

¹⁸ MARTIN-GAGO, José Ángel *et al*: *El nanomundo en tus manos*. Crítica.

¹⁹ En el que sus electrones están confinados en las tres dimensiones.



Otro fullereno son los **nanotubos de carbono**. Este alótropo nos ha acompañado desde la prehistoria debido a que en las hogueras se producen cierta cantidad de ellos debido a la combustión. Pero no fue hasta 1991 cuando el japonés Sumio Iijima los descubrió mientras estudiaba los depósitos de carbono resultantes de la vaporización del grafito mediante descarga en arco eléctrico.²⁰⁻²¹ Ver figura 7.

Figura 6. Estructura del fullereno C60. Compuesto de 60 átomos de carbono, asemeja la forma de un balón de fútbol. De hecho, la relación de tamaños entre esta buckyball y un balón de fútbol es la misma que dicho balón y la Tierra. Imagen obtenida de la Red.

Como se puede apreciar en la figura 7, un nanotubo bien podría verse como una lámina de grafeno enrollada. De hecho, una de las tantas técnicas que existen, consiste en cortar dichos nanotubos para que se desenrollen y obtener así una lámina de grafeno. Como muestra, podemos ver la patente otorgada en 2006 a Bor Z. Jang y Wen C. Huang como integradora de este proceso.²²

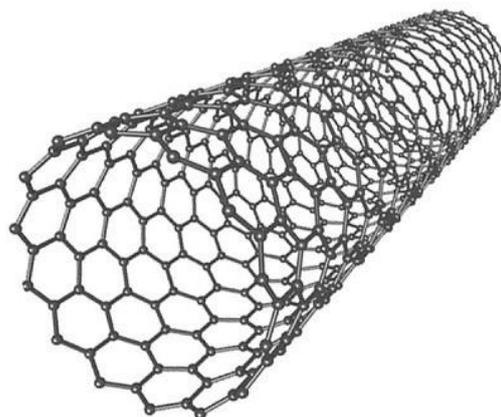


Figura 7. Estructura del nanotubo de carbono. Imagen obtenida de la Red.

Los nanotubos de carbono es un tipo de material catalogado como “unidimensional”.²³

²⁰ Un arco eléctrico es la descarga eléctrica que se forma entre dos electrodos sometidos a una diferencia de potencial y colocados en el seno de una atmósfera gaseosa.

²¹ MARTIN-GAGO, José Ángel *et al*: *El nanomundo en tus manos*. Crítica.

²² Número de patente: US 7.071.258 B1

²³ Dos de sus dimensiones están por debajo de 100nm. Sus electrones están confinados en esas dos.

CARBINO

Otro alótropo del carbono que ha sido recientemente desarrollado es el carbino²⁴. El carbino consiste en una cadena de átomos de carbono unidos por enlaces triples alternados con enlaces simples, o bien con enlaces dobles consecutivos. Según sus propios investigadores, el carbino es dos veces más fuerte que el grafeno. El problema de este material es su inestabilidad. Hasta hace muy poco sólo se pudo encadenar 44 átomos de carbono. Pero en 2016 Lei Shi *et al*²⁵. Consiguieron encadenar 6.400 átomos de carbono. Para ello, se sirvieron de dos nanotubos—uno dentro de otro—para confinar los electrones del carbino y hacerlo así más estable. *Ver figura 8.*

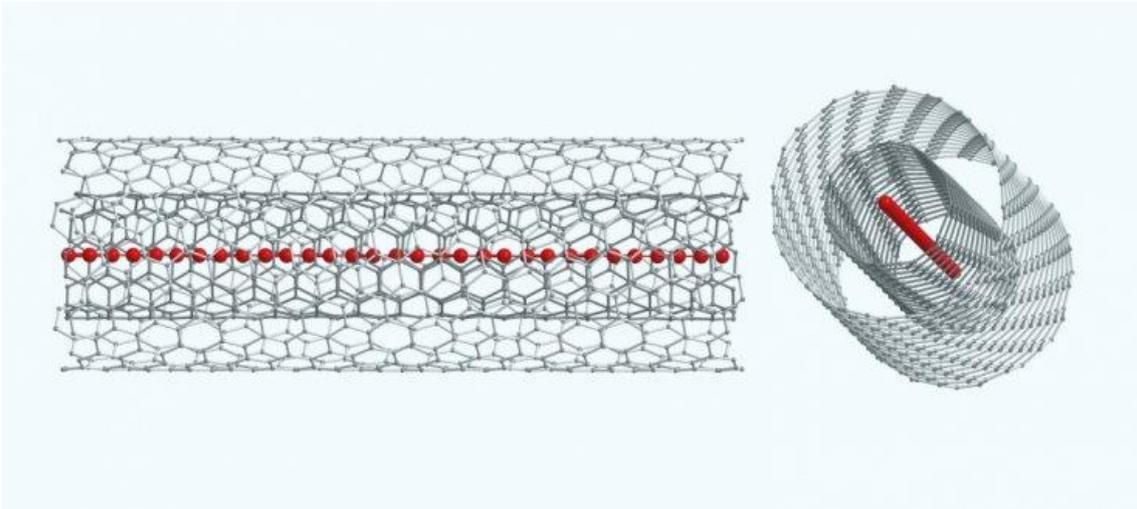


Figura 8. El carbino (en rojo) se vuelve más estable debido a que los dos nanotubos de carbono (en gris) confinan sus electrones. Imagen de Lei Shi / Universidad de Viena.

²⁴ LIU Mingjie, *et al.* “Carbyne From First Principles: Chain of C Atoms, a Nanorod or a Nanorope?” Institute for Nanoscale Science and Technology, Rice University, Houston, Texas.

²⁵ SHI Lei, *et al* “Confined linear carbon chains as a route to bulk carbine”. *Nature Materials* **15**, 634–639

GRAFINO

El estudio del grafino se remonta a varias décadas²⁶. El grafino es bastante similar al grafeno. Como éste, también es un material bi-dimensional²⁷. Pero se diferencian en que, en el grafino, hay tanto enlaces dobles como triples entre los átomos de carbono, por lo que es menos ordenado que el grafeno. Una de sus propiedades esperadas es que conduzca los electrones en una sola dirección. Sin embargo, aún no ha sido sintetizado.²⁸

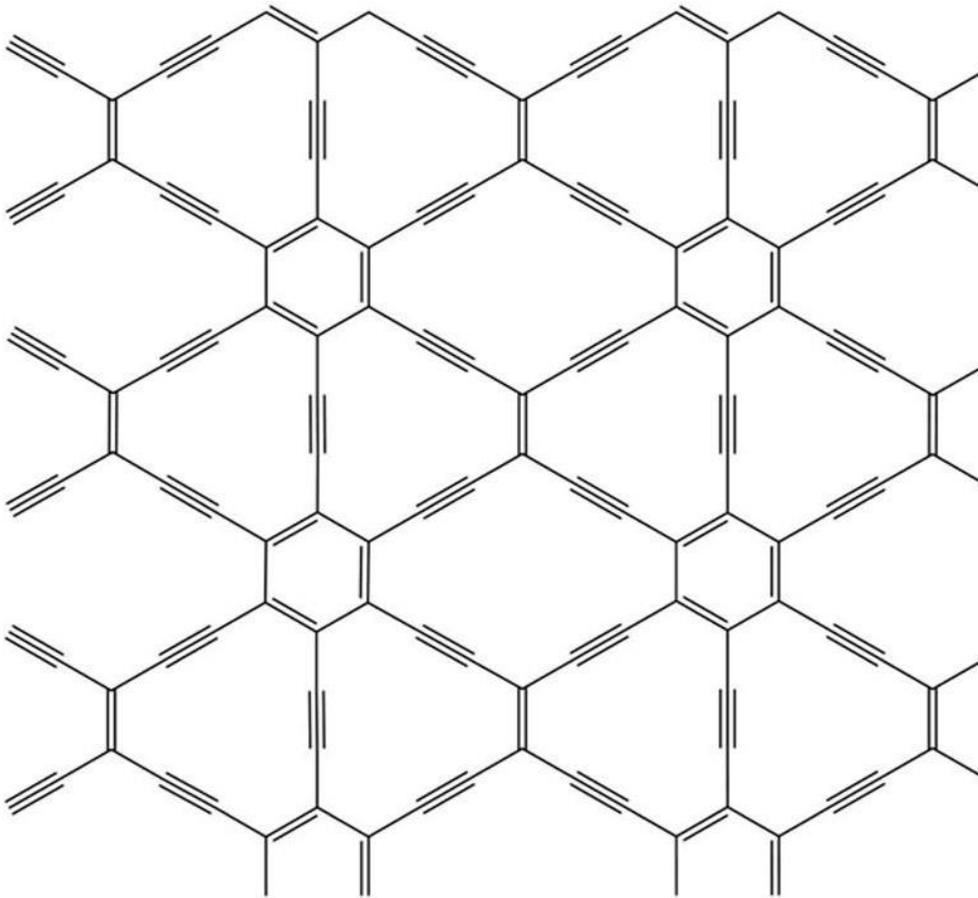


Figura 9. Ejemplo de una estructura de grafino. Imagen de la Universidad de Erlangen-Nuremberg

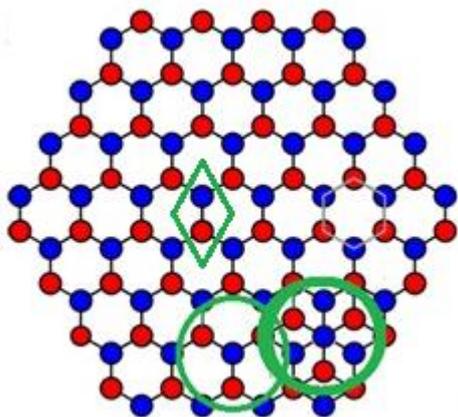
²⁶ Artículo: "Graphyne Could Be Better Than Graphene" de Jon Cartwright para la revista **Science**.

²⁷ Una dimensión del material está por debajo de los 100 nm, por lo que los electrones están confinados en una dirección.

²⁸ MERTENS Ron, *The Graphene Handbook*. 2016.

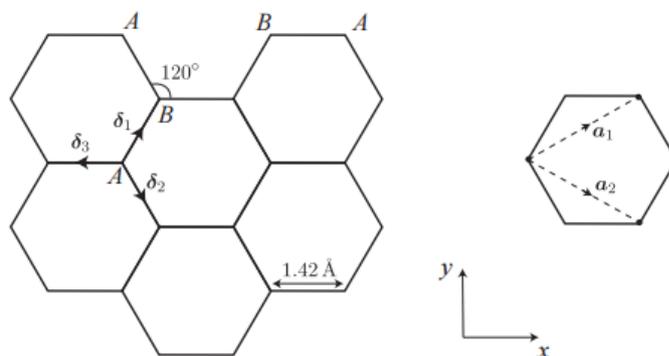
¿Qué es el grafeno?

Como hemos comentado anteriormente, llamamos “grafeno” a una sola capa de grafito. El grafeno está compuesto por dos redes triangulares superpuestas de átomos de carbono que forman un hexágono.



La distancia entre los átomos de carbono es aproximadamente de 1.42 Å o 0.142 nanómetros. Su grosor es de alrededor 0.34 nm, su celda unitaria²⁹ contiene dos átomos de carbono y tiene un área de 0.052 nm². Por lo que su densidad es calculada como 0.77mg/m². Esto quiere decir que un metro cuadrado de grafeno pesaría unos 0.77mg. Dicho metro cuadrado de grafeno podría soportar el peso de un gato de 4 kg y ser más ligero que el peso de uno de sus bigotes.³⁰

Figura 10. Ilustración de las dos redes triangulares: Una roja y otra azul. Como se aprecia en los círculos verdes, las dos redes no se superponen. El rombo verde indica la celda unitaria. Imagen de Francisco R. Villatoro.



$$\mathbf{a}_1 = \frac{a}{2} (3, \sqrt{3}),$$

$$\mathbf{a}_2 = \frac{a}{2} (3, -\sqrt{3})$$

$$\mathbf{b}_1 = \frac{2\pi}{3a} (1, \sqrt{3}),$$

$$\mathbf{b}_2 = \frac{2\pi}{3a} (1, -\sqrt{3})$$

$$\delta_1 = \frac{a}{2} (1, \sqrt{3}),$$

$$\delta_2 = \frac{a}{2} (1, -\sqrt{3}),$$

$$\delta_3 = -a(1, 0)$$

Figura 11. Ilustración matemática del grafeno. Imagen obtenida de Anthony L. Leggett en Lecture 5: Graphene: Electronic band structure and Dirac fermions

²⁹ La celda unitaria es la porción más simple de la estructura cristalina que, al repetirse mediante traslación, reproduce todo el cristal.

³⁰ Datos recogidos por la Real Academia Sueca de las Ciencias para la entrega del Premio Nobel de Física de 2010.

En el grafeno, el enlace entre los átomos de carbono es por hibridación de orbitales³¹ sp^2 . Es decir, tenemos que un átomo de carbono tiene seis electrones: dos en una capa más interna y cuatro en otra más externa. De estos cuatro, tres presentan una geometría que mezcla *una* forma s^{32} y *dos* p (sp^2)—*Ver figura 12—que se enlazan con los átomos de carbono vecinos, produciendo así enlaces de tipo σ (Sigma). Ver figura 14. Esos tres electrones no toman parte en la conductividad, por lo que habrá que señalar al cuarto electrón en forma $p_{(z)}$ como el responsable de esa conductividad y de los enlaces π (Pi).*

Esta disposición de los electrones es la que permite a cada átomo de carbono formar un ángulo de 120 grados, por lo que la disposición de seis átomos de carbono dará lugar a un hexágono perfecto. *Ver figura 13.*

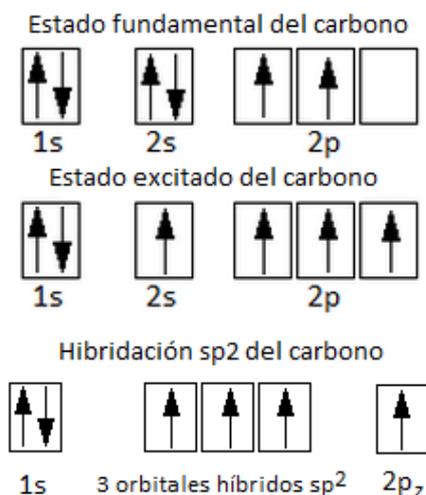


Figura 12. Configuración electrónica del carbono en distintos estados. En la hibridación sp^2 , un orbital s se hibrida con dos orbitales p . Imagen obtenida de Quimitube.

³¹ Un orbital atómico es una zona del espacio donde hay una gran probabilidad (casi mayor del 90%) de encontrar al electrón, lo que supone poder considerar al electrón o electrones como una nube indefinida cargada que gira en torno al núcleo.

³² El significado físico de la ecuación de Schrödinger viene dado por la asignación de unas restricciones conocidas como números cuánticos. Los valores del número cuántico “ l ” representan el tipo del orbital:

Cuando $l = 0$, el orbital es de **tipo s**

Si $l = 1$, los orbitales serán de **tipo p**

Si $l = 2$, los orbitales serán de **tipo d**

Si $l = 3$, los orbitales son de **tipo f**.

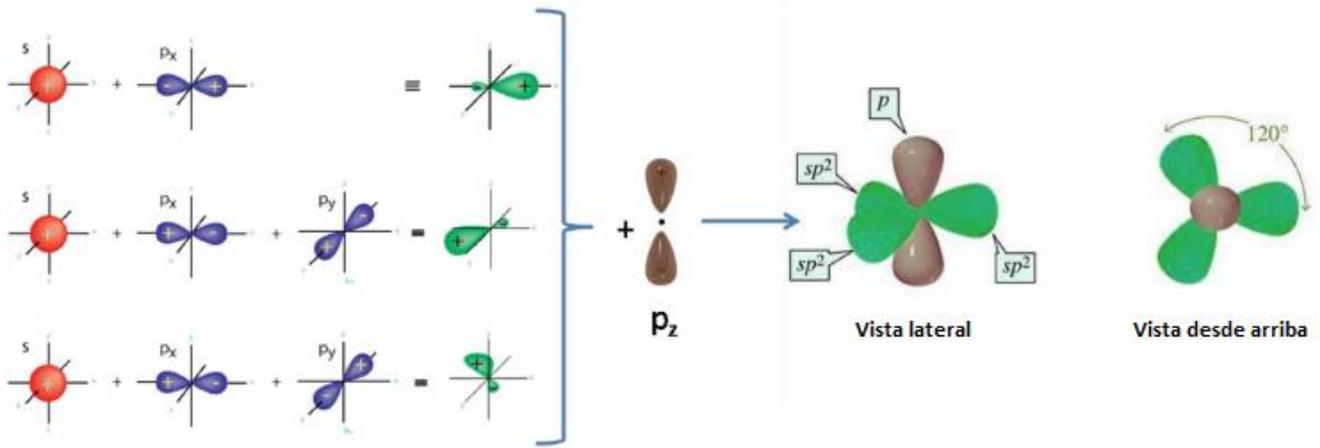


Figura 13. Hibridación sp^2 de un átomo de carbono. Imagen obtenida de la Universidad de Manchester.

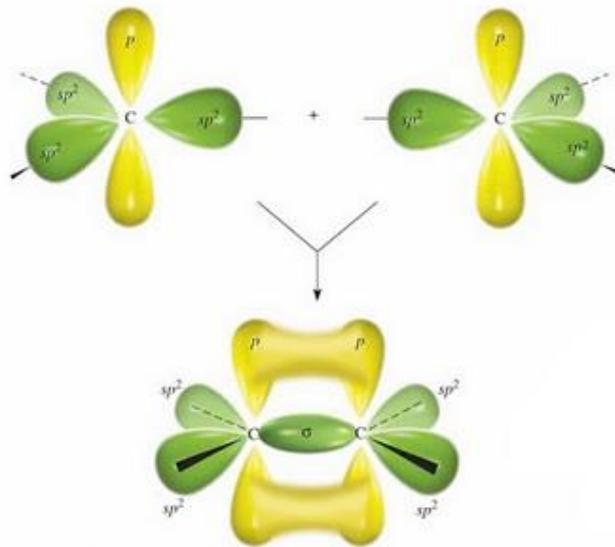


Figura 14. Hibridación sp^2 de dos átomos de carbono en el grafeno. Los enlaces resultantes son σ (entre las dos C) y π (en amarillo) el más débil y causante de la conductividad. Imagen obtenida de Thomson Brooks/Cole.

La larga historia del grafeno

A pesar de que Andre Geim y Konstantin Novoselov se llevaran en 2010 un Premio Nobel por aislar y experimentar con el grafeno en 2004, la historia de este alótropo es mucho más larga y comienza con el grafito. Como hemos mencionado más arriba, no fue hasta mediados del siglo XVI cuando se descubrió un gran yacimiento de grafito en el noroeste de Inglaterra. Y uno de los primeros experimentos de intercalación de grafito fueron realizados en 1840 por el Dr. C. Schafhäütl, quien observó la formación de "grafito azul" tras la reacción con ácido sulfúrico y agentes oxidantes.

En 1859, el químico británico **Benjamín Brodie** publicó en la *Royal Society*³³ su trabajo sobre el peso atómico del grafito. En primer lugar, Brodie ya era consciente de las grandes dificultades de convertir el grafito en láminas más finas mediante procesos



Figura 15. Grafeno probablemente visto por Brodie El óxido de grafito en el fondo del recipiente se disuelve en agua haciendo una suspensión amarilla de copos flotantes de grafeno. Imagen obtenida de "Graphene prehistory". Andre Geim.

mecánicos. Brodie optó por exponer el grafito a fuertes ácidos como el ácido sulfúrico y nítrico; utilizando también el clorato de potasio. El carbono se oxidó y obtuvo lo que él llamó "ácido carbónico" Ver figura 15. Brodie señaló que sus experimentos establecieron un punto importante, esto es, la existencia de un peculiar componente de carbono en forma de grafito (óxido de grafito).

Finalmente, y tras muchos experimentos, descubrió que el peso atómico del grafito era de 33 g/mol. Una observación que indicaba que la ley de Dulong y Petit³⁴ tenía una importante excepción para el calor específico del carbono y sus distintas formas. Por ello, Brodie creía haber descubierto el "graphon", una nueva forma de carbono con un peso molecular de 33 g/mol. Hoy en día, se sabe que lo que Brodie observó fue una suspensión de minúsculos cristales de óxido de grafeno³⁵.

³³ BRODIE, B. C. "On the Atomic Weight of Graphite". *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* 1859 **149** 249-259.

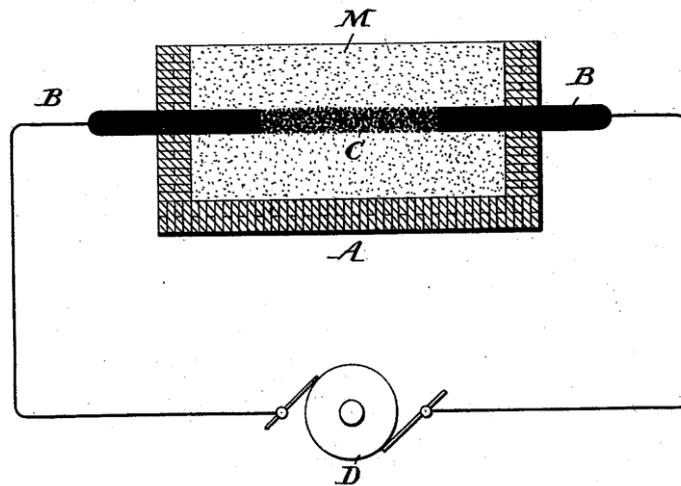
³⁴ Ley de Dulong y Petit: El calor específico atómico de todos los elementos en estado sólido (con pocas excepciones) presenta valores próximos a 25 J/(mol·K) (ó sea, 6 cal/(mol·K), cuando aumenta considerablemente su temperatura.

³⁵ El óxido de grafeno está compuesto por grafito, hidrógeno y oxígeno.

Unos años más tarde, **Edward Goodrich Acheson**, un químico oriundo de Washington (Pensilvania) llevó a cabo la patente número 568,323 el 29 septiembre de 1896. En dicha patente, Acheson asegura que su método es capaz de producir grafito puro y asequible de cualquiera de los más comunes y baratos materiales carbonosos. Tales como el carbón mineral, el carbón vegetal, el coque, etc.

Acheson tildaba de insignificante e impracticable la idea de generar grafito sometiendo carbono puro a altas temperaturas en un horno eléctrico. El químico descubrió que, para producir grafito puro a partir de materiales carbonosos, existe una conversión indirecta. La clave estaría más en un acto de disociación del carbono de su combinación con otros materiales que en una conversión del carbono ordinario en grafito, y que, como paso preliminar, el carbono tiene que ser combinado químicamente con algún otro material.³⁶

Por ello, Acheson utilizó materiales como sílice (dióxido de silicio), óxido de aluminio, magnesia (óxido de magnesio), etc. Así como también tuvo que diseñar un tipo de horno eléctrico que se ajustara a sus necesidades.



Diseño del horno en la patente de E.G. Acheson

En este diseño, los electrodos *B* y *B* (barras de carbono) son conectados a la fuente de energía eléctrica *D*. Dicha corriente llega al centro *C*, compuesto por carbón activo, que está rodeado de una mezcla *M*, compuesta de óxidos. Todo ello contenido en ladrillos refractarios, *A*.

Conforme va aumentando la energía, se forma carburo de silicio (SiC) Posteriormente el carbono se separa del carburo de silicio y toma una forma gráfitica. Mientras, el

³⁶ Esta misma idea fue utilizada en 1975 por van Bommel y su equipo para crear capas gráficas a partir de carburo de silicio. Dicha técnica, conocida como crecimiento epitaxial de grafeno en SiC (0001), permite la producción de grafeno.

silicio se volatiliza (pasa a un estado gaseoso) en forma de vapor. Finalmente, este proceso se expande hasta los límites de los ladrillos refractarios (A)

Diez años más tarde, el 19 de febrero de 1907, Acheson obtuvo una nueva patente³⁷. Esta vez en el histórico Welland County, Ontario (Canadá). En dicha patente Acheson presentaba un nuevo material derivado del grafito y su método para obtenerlo. Este nuevo material lo llamó “grafito defloculado”.

El caso es que Acheson estaba motivado por el “grafito untuoso”, es decir, un grafito que se adhiere a la superficie de los cuerpos sólidos. El uso del grafito untuoso como lubricante bajo ciertas condiciones es complicado o imposible. Para solucionar esta situación Acheson mezcló ácido tánico con agua y la solución resultante fue añadida al grafito. El resultado es el “grafito defloculado” que sí podía mezclarse con agua o aceite y permanecer en suspensión a diferencia del untuoso. Acheson observó que, sólo añadiendo un 0.5% de su nuevo grafito en aceite, éste reduce enormemente la fricción y extiende la vida del material. Se trataba de un nuevo material que podría contener copos de grafeno.³⁸

³⁷ US 844989 A. *Deflocculated graphite and process of deflocculation thereof.*

³⁸ Un copo de grafeno o “graphene flake” es un trozo de grafeno que no presenta tanta pureza ni llanura como una capa de grafeno de alta calidad. Como el manejo del grafeno es complicado, se puede recurrir a estos copos para mejorar otros materiales, pues guardan muchas de las propiedades de la capa de grafeno perfecta. Ver *figura 37*, página 35.

Aunque en 1895 el físico alemán **Wilhelm Röntgen** había descubierto los rayos X, no fue hasta 1913 cuando **Max von Laue** realizó los primeros experimentos de difracción con rayos X. Y es que los rayos X tienen una longitud de onda de 0.1 nanómetros, haciéndolos ideales para determinar estructuras atómicas sólidas. La idea de von Laue era que la disposición regular de átomos en un cristal podría actuar como una rejilla de difracción tridimensional para los rayos X.

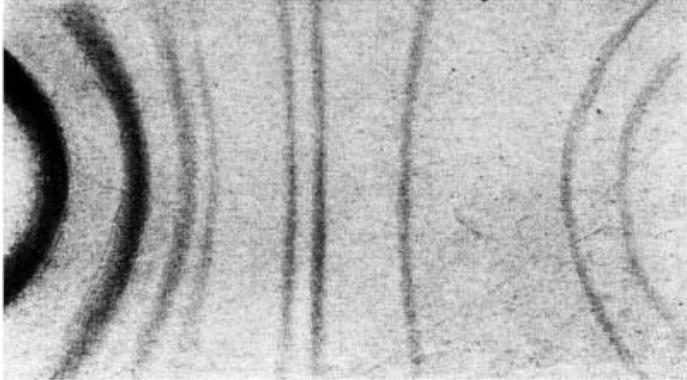


Figura 16. Diagrama de difracción de limaduras de grafito. Imagen obtenida de la Oxford University Press

El experimento consiste en que se proyectan rayos X que pasan por un colimador para que los rayos X no se proyecten en todas direcciones y se consiga un único haz. A continuación, el haz incide en una muestra del material cristalino. Al chocar con el material, los haces refractados generan un patrón (patrón de Laue) en una película fotográfica.

Con todo ello, en 1916, **Peter Debye** y su alumno **Paul Scherrer**, se lanzaron a experimentar con distintos componentes, entre ellos el grafito³⁹. Ver figura 16.

Unos años más tarde, en 1924, la estructura del grafito fue determinada por **J. D. Bernal** mediante difracción⁴⁰. Ver figura 17. En donde se puede apreciar la forma del grafito tal y como la conocemos hoy en día.

³⁹ DEBIJE, P; SCHERRER, P (1916). "Interferenz an regellos orientierten Teilchen im Röntgenlicht I" *physikalische Zeitschrift* 17: 277

⁴⁰ BERNAL, J. D. (1924) "The Structure of Graphite". *Proc. R. Soc. Lond.* Vol. 106, No. 740 (Dec. 1, 1924), pp. 749-773.

The Structure of Graphite.

767

apart. This should not be surprising, as in the absence of other carbon atoms in the immediate vicinity the atoms in the rings might be considered to draw

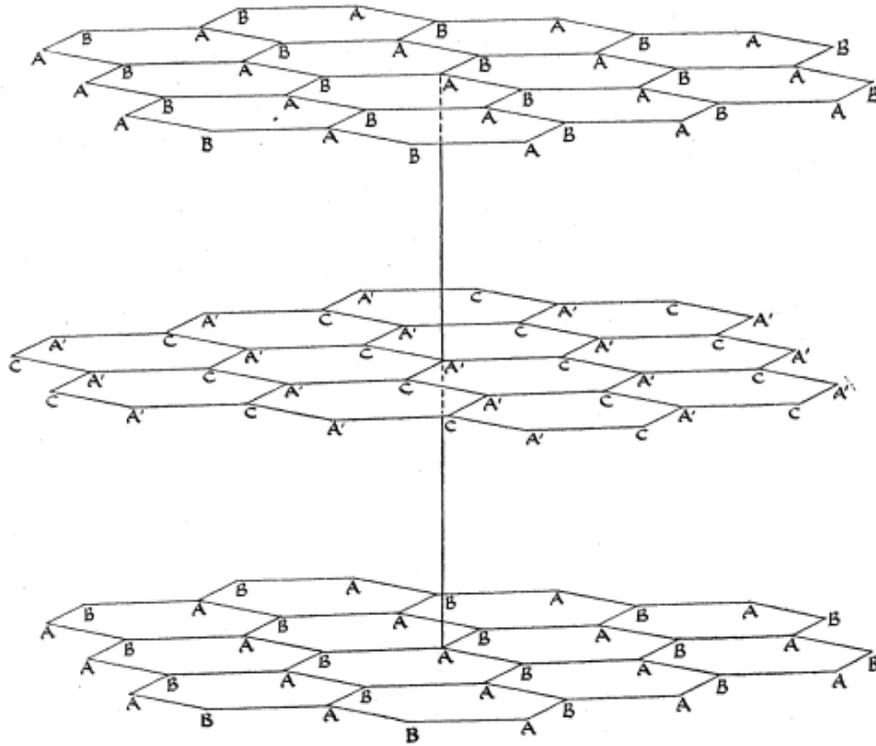


FIG. 13.

closer together than they do in diamond. The great difference between the mechanical properties of graphite and diamond (hardness, flexibility, etc.) is

Figura 17. Estructura de grafito publicada por J. D. Bernal. En ella se pueden apreciar las capas de grafito. Imagen extraída de BERNAL, J. D. (1924) *The Structure of Graphite*.

Un aspecto curioso sobre el grafeno es que se creía que no podía existir. Entre 1935 y 1937, el nobel de Física **Lev Landáu** y **Rudolf Peierls** establecieron que no podría existir ningún material bidimensional por ser termodinámicamente inestable. Los físicos apuntaban a que las fluctuaciones térmicas en estas redes cristalinas bidimensionales desplazarían a los átomos que la componen. Ya que, como apuntarían Mermin y Wagner⁴¹ más tarde, el punto de fusión decrece rápidamente cuando el espesor disminuye. Con lo cual, la lámina entera se desintegraría con un ligero cambio de temperatura.

Por dicha razón, y hasta el descubrimiento del grafeno, las monocapas eran conocidas como parte integral de grandes estructuras 3D.⁴² Sin embargo, lo que hace posible la existencia del grafeno son las pequeñas ondulaciones sobre su superficie. Ver figura 18.

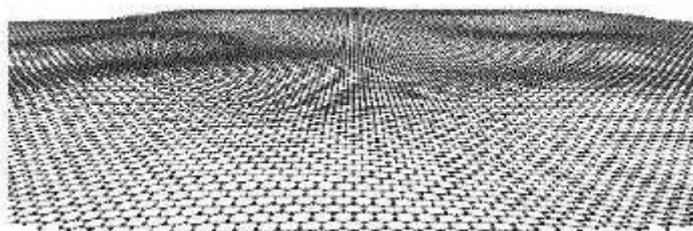


Figura 18. Ondulaciones presentes en el grafeno. Imagen de "The structure of suspended graphene sheets" Geim et al.

Es decir, el grafeno no presenta una superficie completamente plana, sino que existen pequeñas ondulaciones que lo convierten en termodinámicamente estable.⁴³

En la década de 1930 se siguió estudiando la estructura y el enlace del grafito. Y el 1 de mayo de 1947, la *Physical Review* publica el trabajo teórico de **Philip Russell Wallace** sobre la estructura de bandas del grafito. Aunque quizá ya sea más conveniente hablar de *grafeno*, pues el estudio de Wallace se centra en una única capa de grafito o monocapa.

La estructura de bandas o *Teoría de Bandas* es, en física de estado sólido, una teoría según la cual se describe la estructura electrónica de un material. Dicha teoría establece que los orbitales atómicos se combinan para dar unos orbitales moleculares. Si se combinan n orbitales atómicos, se obtienen n orbitales moleculares. Estos tienen diferentes energías, pero están muy próximas entre sí. Tan próximas están entre sí que decimos que se forma una *banda*. Se le llama *banda de valencia* a aquella que representa a los electrones que se encuentran en el último nivel energético de los átomos. Los electrones de valencia son los que forman los enlaces entre los átomos, pero no intervienen en la conducción eléctrica. Mientras que a la banda formada por

⁴¹ Mermin, N. D. "Crystalline order in two dimensions". *Phys. Rev.* 176, 250-254 (1968)

⁴² GEIM, A.K. y NOVOSELOV, K.S. *The Rise of Graphene*.

⁴³ Meyer J.C., Geim A.K., Katsnelson M.I., Novoselov K.S., Booth T.J. and Roth S., "The structure of suspended graphene sheets" *Nature* 446, 60-63 (2007)

los electrones libres—es decir, aquellos que se han separado de sus átomos y pueden moverse fácilmente—se le denomina *banda de conducción*. Dicha banda es la responsable de la conducción de la corriente eléctrica

Si entre la banda de valencia y la banda de conducción hay una separación, hueco, banda prohibida o *gap*, a los electrones les cuesta moverse al siguiente nivel energético. Por lo que decimos que dicho material aísla. Ver figura 19.

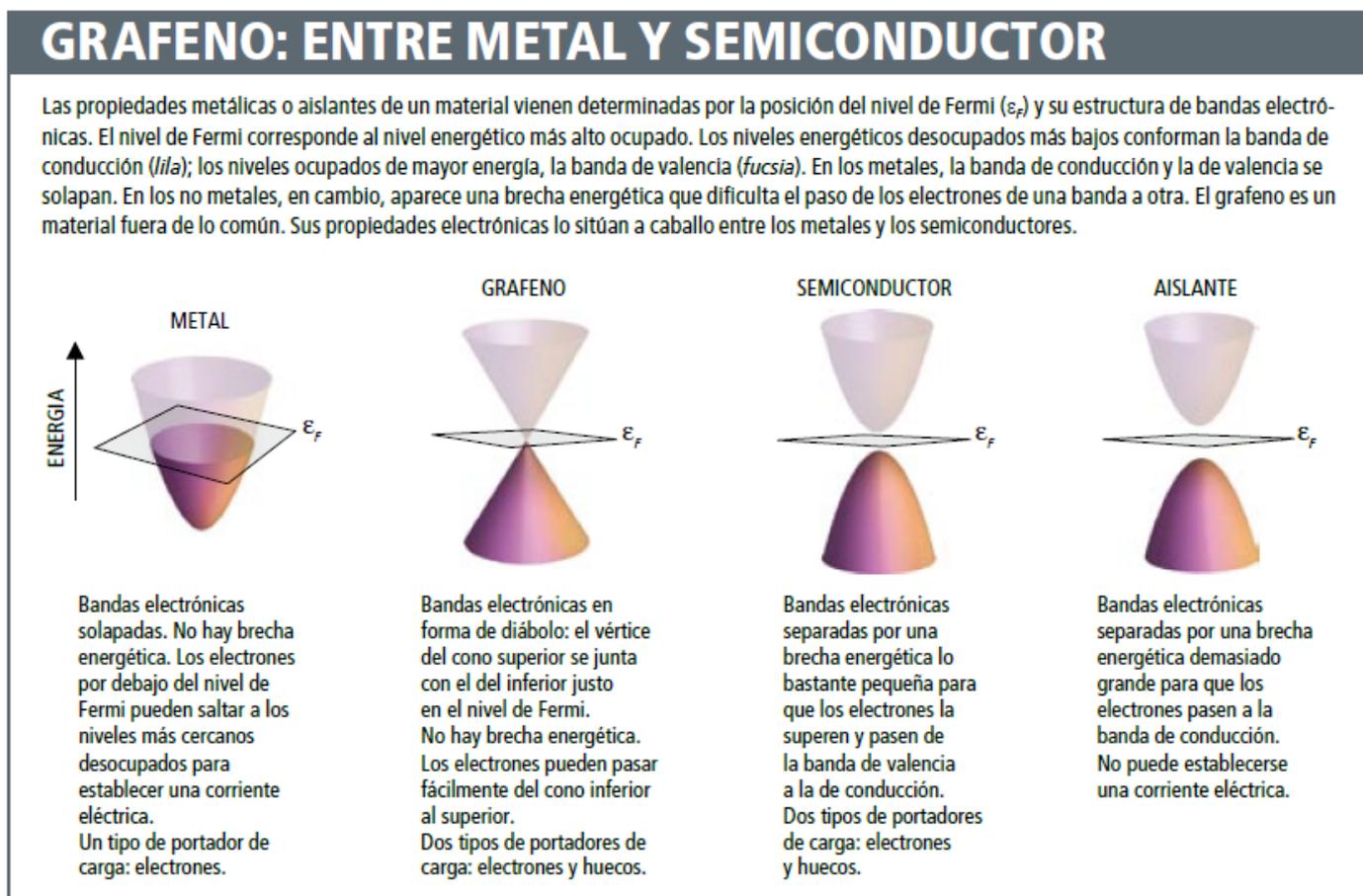


Figura 19. Diferentes estructuras de bandas entre metal, grafeno, semiconductor y aislante. Como se puede apreciar, el grafeno constituye una interesante anomalía. Imagen de Francisco Guinea et al. "Electrónica del grafeno".

Pues bien, Wallace descubrió⁴⁴ que en una sola capa de grafito no hay electrones en la banda de conducción a baja temperatura. Pero que, a mayores temperaturas y energía, es posible pasar fácilmente electrones de la banda de valencia a la banda de conducción. Por lo que el material puede transmitir muy bien la electricidad. Y es que, en el grafeno, cerca del nivel de Fermi, la dispersión de los electrones y huecos⁴⁵ es

⁴⁴ WALLACE, P. R. 1947 *Phys. Rev.* **71** 622

⁴⁵ En electrónica, un "hueco" es la ausencia de un electrón en la banda de valencia. Este hueco afecta al movimiento de los demás electrones. Por lo que se trata de un modo muy sencillo y didáctico de estudiar los movimientos de los electrones si es tomado este "hueco" como una cuasipartícula.

lineal⁴⁶. Esto es un hecho que contrasta con los metales, semiconductores y aislantes. Pues en ellos, las masas efectivas son dadas por la curvatura de las bandas de energía⁴⁷, pero en el grafeno no existen dichas curvas, por lo que los portadores de carga tienen *ceros masa efectiva*. La ecuación que describe la excitación en el grafeno es formalmente idéntica a la ecuación de Dirac para los fermiones sin masa⁴⁸, los cuales viajan a una velocidad constante. Como consecuencia, los puntos de conexión de los conos son llamados *puntos de Dirac*. En estos puntos, los electrones y los huecos se mueven sin obstáculos ni ninguna interacción de ningún tipo, alcanzando la máxima velocidad de 10^6 m/s.⁴⁹ Esto es, 300 veces menos que la velocidad de la luz en el vacío. Por ello, el grafeno es llamado *superconductor*. Como veremos más adelante, una consecuencia de esta dispersión es el efecto túnel cuántico, el cual se vuelve inusual en el grafeno.

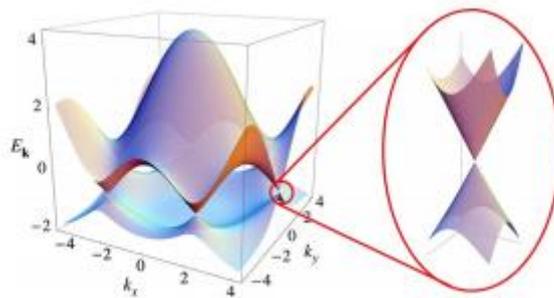


Figura 20. Estructura de bandas del grafeno con los conos de Dirac. Imagen de "The electronic properties of graphene" Castro Neto et al.

⁴⁶ Las bandas π (producidas por el cuarto electrón) debido a la ausencia de más capas atómicas por encima y por debajo y a la simetría de la red de átomos de carbono, presentan una relación de dispersión que es lineal alrededor del nivel de Fermi.

⁴⁷ En los metales, los electrones muestran en su movimiento cierta inercia, que se caracteriza por una masa efectiva (distinta de la masa real del electrón en el vacío). Dicha inercia procede de una interacción con los campos electrostáticos de la red cristalina.

⁴⁸ La ecuación de onda por excitación fue apuntada por J.W. McClure en 1956. Y su similitud con la ecuación de Dirac fue mostrada por G. W. Semenoff y D. P. DiVincenzo y E. J. Meleen en 1984.

⁴⁹ CASTRO NETO et al. "The electronic properties of graphene". *Rev. Mod. Phys.*, Vol. 81, No. 1. Pág. 113

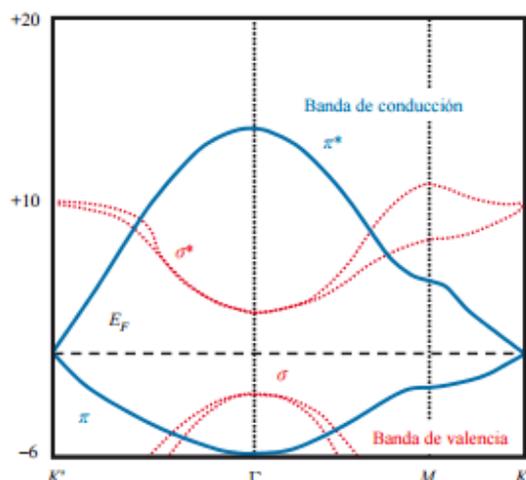


Figura 21. Las bandas π presentan una relación de dispersión que es lineal alrededor del nivel de Fermi. Donde se tocan las líneas azules se encuentran los conos de Dirac. Imagen de "Ha nacido una estrella. El grafeno." De A. L. Vázquez de Parga.

Ya en 1962, **Hanns-Peter Boehm** y su equipo continuaron el trabajo de G. Ruess y F. Vogt sobre el óxido de grafito reducido.⁵⁰⁻⁵¹ Boehm buscaba poder conseguir los fragmentos más delgados de óxido de grafito reducido posible. Para conseguir esas láminas extremadamente finas utilizaron la deflagración del óxido de grafito y la reducción del óxido de grafito en una suspensión alcalina. Entre los fragmentos obtenidos, Boehm y su equipo identificaron algunos como "monocapas" de óxido de grafito reducido.⁵²

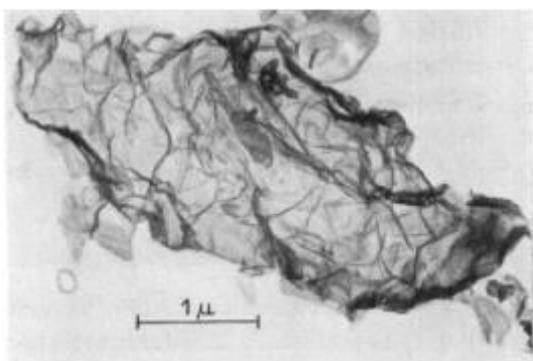


Figura 23. Hollín obtenido por deflagración de óxido de grafito. Imagen de H. Boehm et al. (Referencia 51)

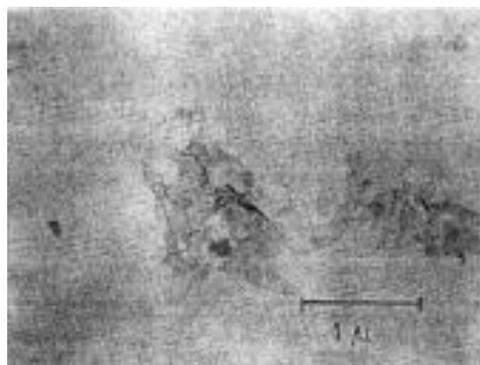


Figura 223. Delgada lámina de óxido de grafito reducido. Imagen de H. Boehm et al. (Referencia 51)

⁵⁰ El óxido de grafito reducido o "r-GO" es el resultado de eliminar el oxígeno y el hidrógeno del óxido de grafito. El objetivo es el de obtener una capa o varias de carbono.

⁵¹ G. Ruess y F. Vogt utilizaron un microscopio electrónico de transmisión (utiliza un haz de electrones para visualizar un objeto) para observar una muestra seca de óxido de grafito en suspensión.

⁵² Boehm, H., Clauss, A., Hofmann, U & Fischer, G. "Dünne Kohlenstoff-Folien". *Z Fur Naturforschung B* 17, 150-& (1962).

Boehm y su equipo llegaron a encontrar láminas de un grosor de 3.6 Å.⁵³ De hecho, aunque en aquel momento los descubrimientos del equipo alemán recibieron muy poca atención, Andre Geim no duda en reconocerle el mérito a Boehm y a los suyos. Para el nobel de Física⁵⁴, el equipo alemán fue el primero en observar grafeno. No en vano, en 1986 Boehm introdujo el término “grafeno”⁵⁵ para referirse a estas monocapas como ya señalamos al principio del documento.

Otro acontecimiento a resaltar en la historia del grafeno es el trabajo de **A. J. van Bommel** y su equipo sobre el crecimiento epitaxial⁵⁶ del carbono. En 1975 van Bommel⁵⁷ ⁵⁸y su equipo experimentaron con el carburo de silicio (SiC) calentándolo en el vacío a más de 800 grados Celsius. Observaron que en el proceso se formaban capas grafiticas. Con ello confirmaron la observación de Acheson de que el material se grafitiza porque el silicio sublima desde las superficies del cristal. Sin embargo, también observaron que las diferentes caras se grafitizaron de manera distinta. El grafito se forma mucho más lento en la superficie de la cara terminada en silicio (0001) (o cara Si) que en la superficie de la cara terminada en carbono (000-1) (cara C). El grafito crecido en la cara terminada en silicio (cara Si o 0001) era claramente epitaxial (es decir, alineado con el sustrato de silicio) mientras que el carbono formado en la cara terminada (cara en C) parecía estar rotacionalmente desordenada al cristal. Van Bommel identificó películas de monocapa de grafito (es decir, grafeno) que estaban desacopladas del sustrato de SiC y por lo tanto, eran electrónicamente equivalentes a hojas de grafeno aisladas. Desde 1975, estas películas se denominaron *grafito monocapa*, *grafito bidimensional* o simplemente *grafeno epitaxial*.

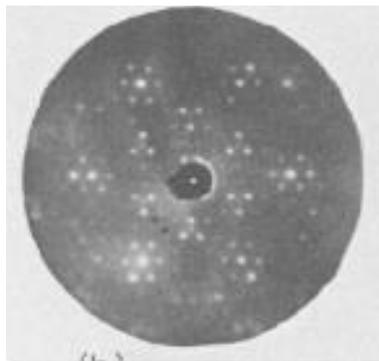


Figura 24. Imagen LEED de la cara Si observada por van Bommel. Imagen de Walt A. de Heer

⁵³ BOEHM, H. P. et al. “Surface of properties of extremely thin graphite lamellae”.73-80. **Anorganisch-Chemisches Institut der Universität**, Heidelberg.

⁵⁴ GEIM, Andre. *Random walk to graphene*. Nobel Lecture. December 8, 2010

⁵⁵ BOEHM H. P., Setton R y Stump E. 1986 *Carbon* **24** 241

⁵⁶ A partir de una cara de un cristal se hace crecer una capa uniforme y de poco espesor con la misma estructura cristalina que este.

⁵⁷ VAN BOMMEL, A. J. et al. “LEED and Auger electron observations of the SiC(0001) surface”. **Surface Science**. Volume 48, Issue 2, 2 March 1975, Pag 463-472

⁵⁸ WALT A. DE HEER. *The Development of Epitaxial Graphene For 21st Century Electronics*.

En 1998, **I. Forbeaux**⁵⁹ y su equipo confirmaron estos resultados. Las capas de grafito estaban esencialmente desacopladas del sustrato, por lo que concluyen que el crecimiento capa por capa abre la posibilidad de una sola capa de grafeno "flotante".

Los esfuerzos para hacer películas delgadas de grafito por exfoliación mecánica comenzaron en los años noventa, pero no se llegó a producir nada más delgado de 50 capas hasta 2004.⁶⁰ En este periodo se sucedieron varias investigaciones sobre las capas de grafito; entre ellas podemos destacar las de Yoshiko Ohashi, quien desde 1997 hasta el 2000 realizó estudios eléctricos sobre las películas delgadas de grafito (unas 60 capas). En 1999 Rod Rouff y sus compañeros utilizaron un microscopio electrónico de barrido (SEM) para fotografiar plaquetas⁶¹ delgadas de grafito como las de la *figura 25*. En 2001 Thomas Ebbesen (quien ya en 1995 habló de la posibilidad de una nanoelectrónica en base al grafeno) y su equipo llegaron a por debajo de 60 capas.

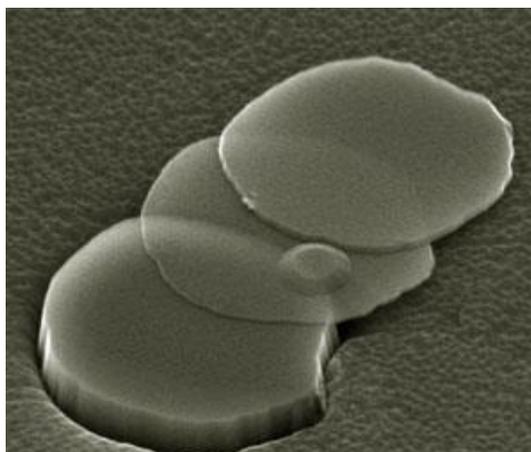


Figura 25. Imagen SEM de delgadas plaquetas de grafito. Imagen tomada de Andre Geim "Graphene prehistory"

⁵⁹ FORBEAUX, I. et al. "Heteroepitaxial graphite on 6H-SiC(0001): Interface formation through conduction-band electronic structure". *Physical Review B: Condensed Matter and Materials Physics* 58, 16396-16406 (1998)

⁶⁰ GEIM Andre and KIM Philip. "Carbon Wonderland". *Scientific American*. April 2008

⁶¹ Las plaquetas o "nanoplaquetas" de grafeno son un tipo de copo de grafeno en forma de disco.

2004: EL AÑO DEL GRAFENO

Como hemos podido ver a lo largo de este documento, los pasos tras el grafeno tienen una larga historia. Fue en 2004 cuando los investigadores de la Universidad de Manchester **Andre Geim** y **Konstantin Novoselov** consiguieron aislar una sola capa de grafito (grafeno) y experimentar con ella.



Figura 266. Fotografía de Andre Geim para el Premio Nobel. Imagen extraída de www.nobelprize.org

La trayectoria de Geim y Nososelov hasta el Nobel fue un poco azarosa como ellos la definen⁶². Un día Geim leyó una reseña de Millie Dresselhaus⁶³ sobre los compuestos intercalados del grafito. Ello le hizo pensar que, a pesar de tantos años, el grafito era un material muy poco comprendido. Geim se dispuso a seguir buscando y encontró un artículo de Pablo Esquizani y Yakov Kopeleich⁶⁴ sobre algunas propiedades interesantes del grafito. Esto le provocó un gran interés por ocuparse de este material. Mientras Geim trataba con su alumno Da Jiang (quien había recibido el encargo de conseguir capas de grafito lo más finas posible) Oleg Shklyarevskii, un amigo de Geim y experto en microscopios de efecto túnel (STM por sus siglas en inglés), intervino trayendo un pedazo de cinta adhesiva con escamas de grafito unidas a él que acababa de sacar de una papelería.⁶⁵



Figura 27. Fotografía de Konstantin Novoselov para el Premio Nobel. Imagen extraída de www.nobelprize.org

Al parecer, a la hora de obtener una superficie de grafito⁶⁶ limpia para ser observada por el STM, se utiliza una cinta adhesiva para eliminar la capa superior. Esta técnica era utilizada desde hacía mucho tiempo, pero nunca nadie se había parado a observar qué era lo que se desechaba en esa cinta. Geim miró con el microscopio los restos de grafito (figura 28) y encontró piezas mucho más delgadas (de unos 20 nm) que las obtenidas por Da Jiang.

⁶² Se pueden ver sus autobiografías en www.nobelprize.org

⁶³ M.S. Dresselhaus, G. Dresselhaus. *Adv. Phys.* **30**, 139 (1981)

⁶⁴ Y. Kopelevich et al. *Low Temp. Phys.* **119**, 691 (2000) y P. Esquinazi et al. *Phys. Rev.* **B65**, 241101 (2002)

⁶⁵ GEIM, Andre. *Random walk to Graphene*.

⁶⁶ Concretamente “grafito pirolítico altamente orientado” o “HOPG”. Este material es un agregado de monocristales de grafito de grandes tamaños y con una baja desviación angular de los cristales según el eje c ($< 1^\circ$).

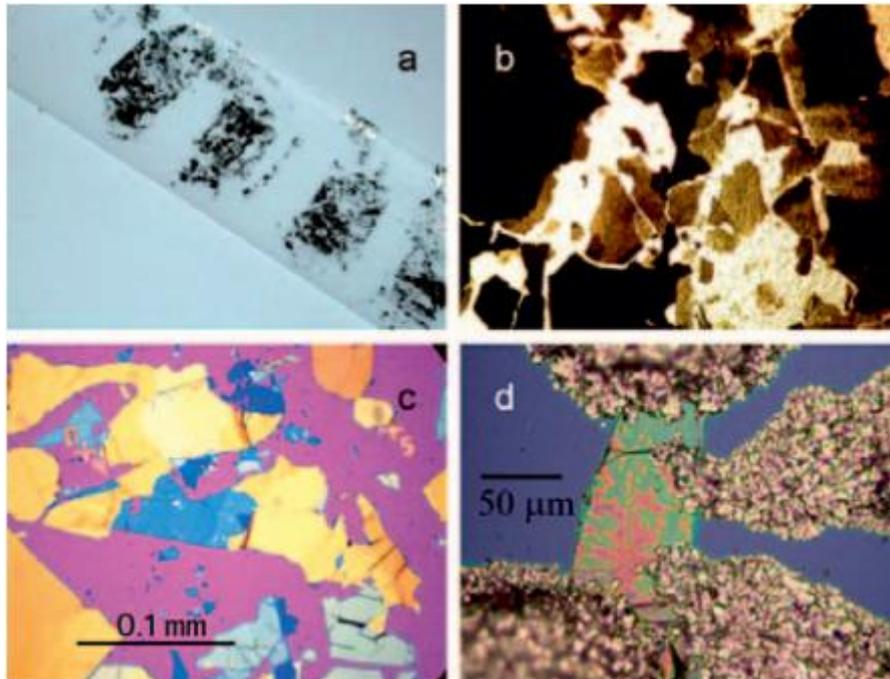


Figura 27. **a-** Remanentes de grafito pirolítico altamente orientado unido a la cinta adhesiva. **b-** Cristal visto por microscopio óptico. **c-** Si se colocan sobre una oblea de Si oxidada, los cristales transparentes dan lugar a varios tonos de azul. **d-** Uno de los primeros dispositivos hechos con un cordón y una cera selladora: en este caso, pinzas, un palillo de dientes y pintura de plata. Imagen extraída de “Random walk to graphene” de Andre Geim.

Geim, Novoselov y su equipo empezaron a experimentar sobre unas pocas capas de grafeno (de unos 3 nm) y también sobre una única capa de carbono. Empezaron estudiando el Efecto de campo eléctrico⁶⁷ en el grafeno⁶⁸. Ver figura 29.

⁶⁷ Cuando hay una partícula de una determinada carga en un espacio dado, éste se ve condicionado y por tanto afecta al comportamiento de una segunda partícula que pueda aparecer.

⁶⁸ NOVOSELOV K.S., GEIM A. K. et al. “Electric field effect in atomically thin carbon films” VOL 306, 666-669. *Science*

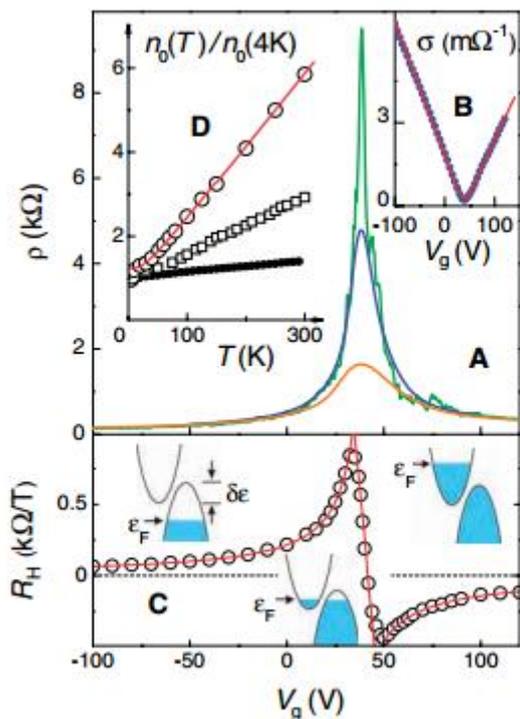


Figura 28. Resultados de los experimentos de Geim et al sobre delgada capas de carbono. Imagen extraída de la referencia 65.

En la *figura 28-A*, podemos apreciar la resistencia de unas pocas capas de grafeno a conducir electrones y huecos a diferentes temperaturas (Verde a 5K, azul a 70K y naranja a 300K) Como se puede observar, el grafeno opone muy poca resistencia. De hecho, en la *figura 28-B*, se coge la curva 70K y se ve que su conducción es lineal antes y después del pico de resistencia.

En la *figura 28-C* se representa el coeficiente del Efecto Hall no cuántico⁶⁹ a temperatura 5K. Y muestra cómo, al elevar el voltaje en un momento dado, la conducción de agujeros cambia a electrones (se aprecian voltajes positivos y negativos). En sus experimentos se alcanzaron densidades de $3 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$, una concentración muy elevada.

Por último, la *figura 28-D* muestra las concentraciones de portadores de carga a distinta temperatura en una sola capa de grafeno (círculos claros), en unas pocas capas (cuadrados) y en varias capas (círculos oscuros). Geim y su equipo descubrieron que, tan sólo unas pocas capas de grafeno, presentaban una movilidad de electrones y huecos por valor de $10.000 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$. Más tarde, en otro estudio⁷⁰, descubrieron que la máxima movilidad teórica en el grafeno a temperatura ambiente es de $200.000 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$.

Un año más tarde, en 2005, se publicaron los trabajos de Geim, Novoselov y Phillip Kim⁷¹ sobre el inusual el efecto Hall cuántico (QHE por sus siglas en inglés)⁷² del grafeno. Ver *figura 29*.

⁶⁹ Si una corriente eléctrica fluye perpendicularmente a través de un conductor situado en un campo magnético, éste campo ejerce una fuerza sobre los portadores de cargas móviles, que tiende a empujarlas hacia un lado del conductor. Midiendo la diferencia de potencial en las dos superficies del material, es posible deducir el signo y la densidad de los portadores de carga.

⁷⁰ NOVOSELOV K.S., GEIM A. K. et al. "Giant Intrinsic Carrier Mobilities in Graphene and Its Bilayer" *Phys. Rev. Lett.* 100, 016602

⁷¹ Ver GEIM A. K., NOVOSELOV K. S. et al. "Two-Dimensional Gas of Massless Dirac Fermions in Graphene". *Nature*. 438, 197-200 Y KIM P. et al. "Experimental Observation of Quantum Hall Effect and Berry's Phase in Graphene". *Nature* 438, 201

⁷² El efecto Hall cuántico es la versión de la mecánica cuántica del efecto Hall, observado en sistemas bidimensionales con electrones sometidos a bajas temperaturas y fuertes campos magnéticos.

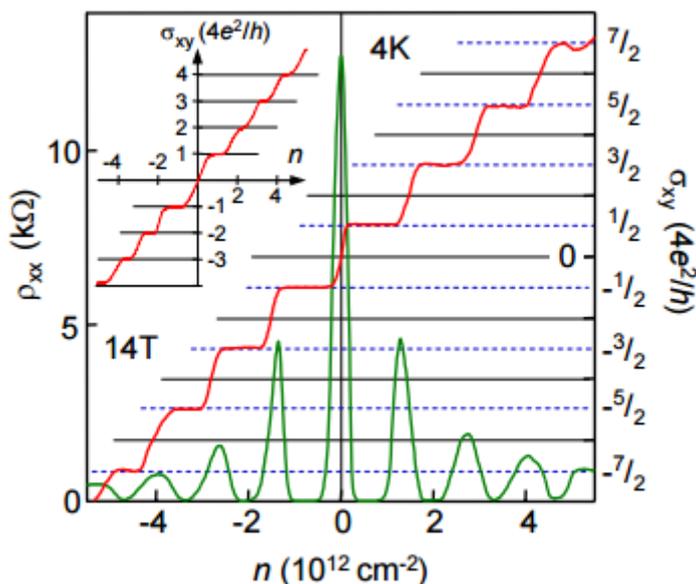


Figura 29. Efecto Hall cuántico en el grafeno. Imagen extraída de "Two-Dimensional Gas of Massless Dirac Fermions in Graphene" Novoselov et al.

La figura 29 representa la observación experimental del inusual QHE en el grafeno. La conductividad de Hall (rojo) y la resistividad longitudinal (verde) en función de la densidad de portadores. La inserción muestra la conductividad de Hall para el grafeno de dos capas. Obsérvese que el espaciamiento entre las mesetas para el grafeno es $4e^2/h$, es decir, mayor que para el QHE habitual y que los pasos se producen en

múltiplos semi-enteros de este valor. Lo normal es obtener valores enteros, pero en el grafeno no es el caso. Se trata de un efecto Hall cuántico fraccionario. Esto quiere decir que, en materiales como el grafeno, la unidad de carga más pequeña no es el electrón, sino una fracción del electrón.

Otro aspecto interesante del trabajo de Geim y Novoselov lo encontramos en un artículo publicado en 2007⁷³. Si bien el QHE es observado a temperaturas muy bajas, Geim y su equipo demostraron que el grafeno es capaz de presentar un QHE a temperatura ambiente (300K) Ver figura 30.

Esto quiere decir que la conductividad del grafeno nunca puede ser nula.

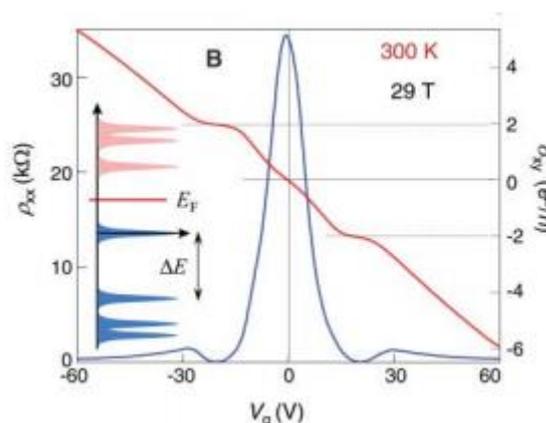


Figura 30. Efecto Hall cuántico a temperatura 300k y un campo magnético de 29 teslas. En rojo la conductividad y en azul la resistividad. Los valores positivos de V_g inducen electrones, y los valores negativos agujeros; en una concentración de $n = (7.2 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ V}^{-1})V_g$. Imagen extraída de "Room-Temperature Quantum Hall Effect in Graphene" Novoselov et al.

⁷³ NOVOSELOV K.S., GEIM A. K. et al. "Room-Temperature Quantum Hall Effect in Graphene". **Science** Vol. 315, 1379.

Otro experimento⁷⁴ interesante de Geim y Novoselov sobre el grafeno es la llamada “paradoja de Klein”. Como hemos mencionado más arriba, los electrones se mueven virtualmente sin obstáculos a través del grafeno, alcanzando velocidades tan elevadas que su comportamiento no puede ser descrito por la mecánica cuántica “ordinaria”. Para dar cuenta de este fenómeno, se utiliza la llamada “mecánica cuántica relativista” o “electrodinámica cuántica” (QED por sus siglas en inglés). Las predicciones de la QED son extrañas y se creían que sólo podrían aplicarse a los agujeros negros o a los aceleradores de partículas de alta energía. Sin embargo, con el grafeno se pueden comprobar una de las más extrañas predicciones de la QED en el laboratorio: El llamado “tunelamiento cuántico perfecto”. Ver figura 31.

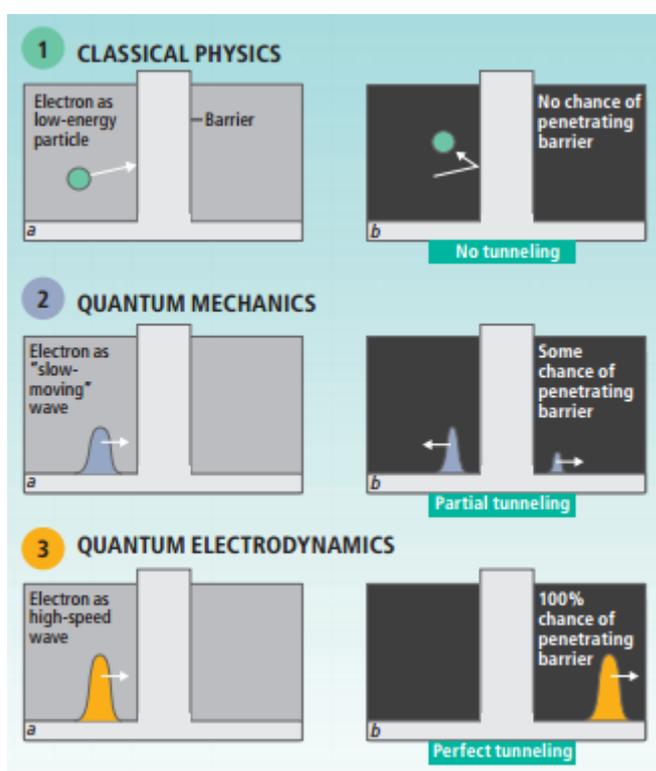


Figura 31. Ilustración del comportamiento de un electrón ante una barrera según la física clásica (1) la mecánica cuántica (2) y la electrodinámica cuántica (3) Imagen extraída de "Carbon Wonderland" Andre Geim y Philip Kim

En la física clásica o newtoniana (1a) un electrón de baja energía actúa como una partícula ordinaria. Si su energía no es suficiente para llevarla por encima de una barrera de energía potencial, permanece atrapada en un lado de la barrera (1b). En el panorama cuántico-mecánico ordinario (2a), un electrón actúa en algunos contextos como una onda que se extiende en el espacio. La onda representa la probabilidad de encontrar el electrón en un punto particular del espacio y del tiempo. Cuando esta onda se aproxima a una barrera de energía potencial, existe alguna probabilidad entre 0 y 100% de penetrarla (2b) Es el llamado “efecto túnel”. Cuando una onda de electrones de alta velocidad en el grafeno (onda naranja en 3a)

llega a una barrera de energía potencial, la QED hace una sorprendente predicción: la onda de electrones penetrará la barrera con un 100% de probabilidades (3b) Ésta es la llamada paradoja de Klein. Sin duda, el grafeno presenta cualidades muy interesantes.

⁷⁴ KATSNELSON M. I., NOVOSELOV K. S. AND GEIM A. K. “Chiral tunnelling and the Klein paradox in graphene”. *Nature*. 620-625.

Son muchas las propiedades interesantes del grafeno y cada vez se descubren nuevos aspectos de este material bidimensional. Por dicha razón, no es extraño que los documentos sobre el grafeno (patentes, descubrimientos, matices, artículos, métodos de producción, etc.) tengan un crecimiento tan espectacular como se ve en la *figura 32*. Seguir todos ellos es sencillamente imposible. Por esa razón, se presenta a continuación una tabla que reúne algunos de los aspectos más interesantes sobre el grafeno hasta la fecha.

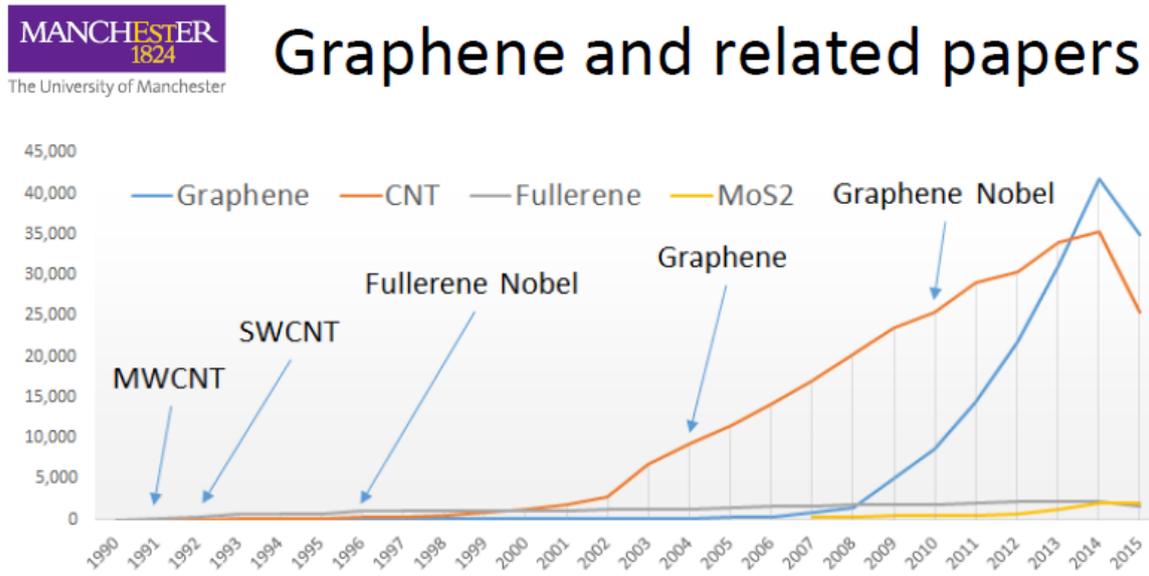


Figura 32. Crecimiento del número de artículos relacionados con el grafeno en comparación con el disulfuro de molibdeno (MoS2), los fullerenos y los nanotubos de carbono monocapa (SWCNT) y multicapa (MWCNT). Imagen extraída de la Universidad de Manchester.

TABLA DE PROPIEDADES DEL GRAFENO

PROPIEDADES	CARACTERÍSTICAS	POSIBLES APLICACIONES
<i>Mecánicas</i>	Muy delgado, de un grosor de 0.34 ⁷⁵ nm aprox. Y 1m ² pesa sólo 0.77mg.	Biomedicina: tejidos óseos artificiales (duros y flexibles)
	Módulo de Young ⁷⁶ de 1 Terapascal. ⁷⁷ Más de 100 veces más resistente que el acero ⁷⁸ y 6 veces más ligero ⁷⁹ . Se puede estirar un 20% ⁷³	Recubrimientos ultrafuertes Materiales inteligentes Celdas de combustible
	Autoreparación ⁸⁰ : Cualquier daño en la lámina se repara por la captación de átomos de carbono del entorno	
<i>Eléctricas</i>	Efecto Joule reducido ⁸¹ (se calienta menos al conducir los electrones)	Cables superconductores
	Semimetal con conductividad eléctrica muy alta. Su densidad eléctrica es 1 millón de veces que el cobre. ⁸²	Supercondensadores Circuitos integrados basados en carbono
	Para la misma tarea que el silicio, consume menos energía. Pues tiene una movilidad electrónica 100 superior) ⁷⁶	Superbaterías

⁷⁵ No permite ni pasar átomos de helio. Ver Paul L. McEuen et al. "Impermeable Atomic Membranes from Graphene Sheets". 2008. *Nanolett.* 8, 2458

⁷⁶ El módulo de Young expresa la relación entre la tensión ejercida sobre un material y su deformación. En el caso del grafeno, soporta 130 gigapascales como fuerza de tensión (antes de romperse).

⁷⁷ LEE Changgu et al. "Measurement of the Elastic Proprieties and Instrinsic Strenght of Monolayer Graphene". *Science*. Vol. 321. 385-388

⁷⁸ Frente al acero estándar americano (A36).

⁷⁹ ACOSTA Antonio J. La Nanotecnología. **RBA**

⁸⁰ NOVOSELOV K. S. et al. "Graphene re-kints it's holes". *Nano Lett.*, 2012

⁸¹ Kyle L. Grosse et al. "Nanoscale Joule heating, Peltier cooling and current crowding at graphene-metal contacts". *Nature Nanotechnology*.

⁸² MERTENS, Ron. *The Graphene Handbook*. 2016

Químicas	Se puede dopar introduciendo otros elementos para mejorar sus propiedades ⁷⁹ .	Membranas (potabilización de agua, destilación de alcohol, etc.)
	Se puede introducir un poco de grafeno para mejorar las prestaciones de otros materiales. ⁷⁹	Catalizador Detector de sustancias
	Biodegradable no contaminante ⁷⁶ Antibacteriano.	
Radiación	En su forma oxidada absorbe residuos nucleares ⁸³	Limpiador de contaminantes radiactivos
	Soporta radiación ionizante ⁷⁶	Nanoantenas
Ópticas	Es altamente transparente ⁸⁴ . Absorbe el 2.3% de la luz. Esto es mucho para un material 2D	Células solares de altísima eficiencia Pantallas táctiles flexibles
	Genera electricidad al ser alcanzado por la luz ⁸⁵	LEDs orgánicos (OLED)
Térmicas	Conductividad térmica muy alta. DE unos 5.000 W/m/k ⁸⁶	Recubrimientos térmicos
	Autoenfriamiento ⁸⁷	

Tabla base extraída de “La nanotecnología” de Antonio J. Acosta

⁸³ Anna Yu. Romanchuk et al. “Graphene oxide for effective radionuclide removal”. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2013,15.

⁸⁴ GEIM A. K. NOVOSELOV K. S. et al. “Fine Structure Constant Defines Visual Transparency of Graphene” *Science*.

⁸⁵ Jens Christian Johannsen et al. “Tunable Carrier Multiplication and Cooling in Graphene”. *Nano Letters*. December 2 2014

⁸⁶ Alexander A. Balandin et al. “Superior Thermal Conductivity of Single-Layer Graphene”. *Nano Lett.* 2008, 8 (3) 902–907

⁸⁷ <https://news.illinois.edu/blog/view/6367/205363>

Problemas del grafeno

Hemos visto algunas de las características más interesantes del grafeno. Pero este material bidimensional también acarrea una serie de problemas que deben ser resueltos para poder aplicarlo en nuestro día a día.

AUSENCIA DE BANDA PROHIBIDA

La principal característica del grafeno es que es capaz de conducir electrones a una altísima velocidad (10^6 m/s). Pero esa gran conductividad es también un problema. Si el grafeno conduce siempre la electricidad, no puede ser “apagado”. Todo el encendido y apagado de los dispositivos electrónicos requieren de un semi-conductor. Es decir, de un material con una banda prohibida entre la banda de valencia y la de conducción. El grafeno, al ser un superconductor, no tiene dicha banda. Por lo que no puede ser utilizado para la fabricación de transistores. Sin embargo, hay otras opciones. Una de ellas es utilizar dos capas de grafeno en vez de una. En el grafeno bi-capá sí se produce una banda prohibida⁸⁸ (como vemos en la *figura 33*). Por lo que sí se podría utilizar como transistor.

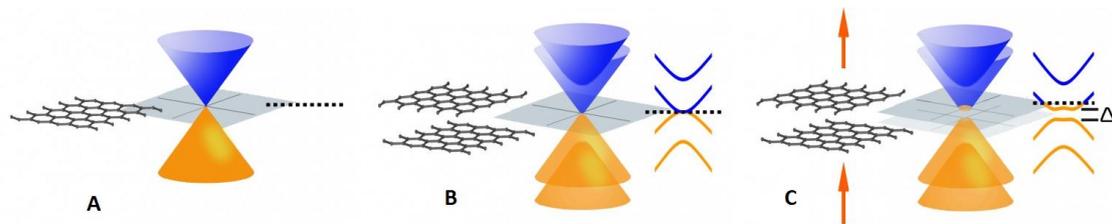


Figura 33. Estructura de bandas del grafeno (A) y del grafeno bi-capá (B y C). Cuando al grafeno bi-capá se le aplica un campo eléctrico (flechas naranjas en C) se crea una banda prohibida debido a la asimetría que se produce entre las dos capas. Imagen extraída de Berkeley Lab.

Otra forma de conseguir que el grafeno contenga una banda prohibida es “dopándolo”. Es decir, haciendo que absorba otro elemento como el potasio⁸⁹. Ver *figura 34*.

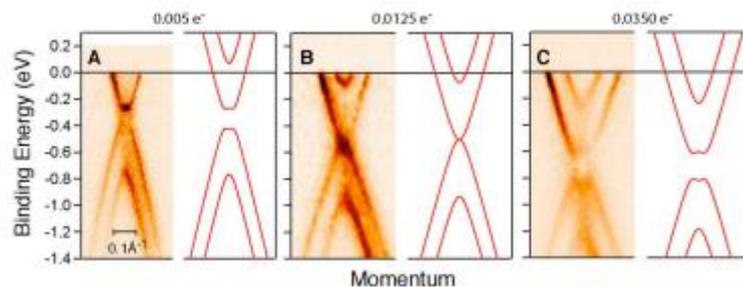


Figura 34. Estructuras de Bandas: A- para una bicapa de grafeno preparada. B y C- bicapa de grafeno con adsorción progresiva de potasio. Imagen extraída de la referencia 86.

⁸⁸ Yuanbo Zhang et al. “Direct observation of a widely tunable bandgap in bilayer graphene”. **Nature Letters**. Vol 459,11 June 2009.

⁸⁹ Taisuke Ohta et al. “Controlling the Electronic Structure of Bilayer Graphene”. **Science**.

Otro aspecto interesante del grafeno es su capacidad para cambiar de propiedades a ser combinado con otros elementos. Por ejemplo, aunque el grafeno sea un superconductor, al combinarlo con el hidrógeno obtenemos un aislante llamado “grafano”⁹⁰. Ver *figura 35*. De esta manera el grafeno obtendría una banda prohibida interesante.

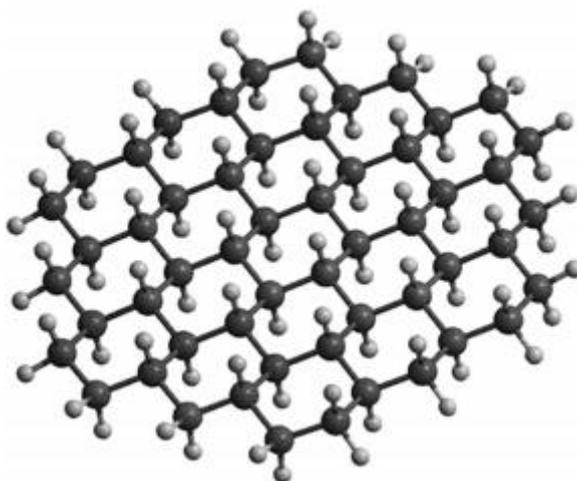


Figura 35. Representación de una capa de grafano. Imagen extraída de “Graphene’s cousin: the present and future of graphane” Chao Zhou et al.

PRODUCCIÓN EN MASA Y COSTE

A fecha de hoy no existe ninguna producción en masa⁹¹. Esto se debe a que es realmente complicado fabricar grafeno a gran escala. En la fabricación de grafeno nos encontramos dos caminos: el precio y la cantidad. La fabricación de grafeno de alta calidad es mucho más costosa que la fabricación de grafeno de baja calidad. Pero éste tiene la ventaja de que puede ser fabricado en mayor volumen. Para ambos casos se utilizan distintos métodos de fabricación. Ver *figura 36*. Como hemos mencionado, no existe fabricación a gran escala, pero sí a pequeña escala que permite fabricar grafeno para su uso en laboratorios a precios relativamente bajos. Sin embargo, podemos encontrar algunas soluciones al problema como es la utilización de productos semejantes al grafeno. Se trata de los copos de grafeno, del óxido de grafeno o del grafeno de pocas capas que ya hemos mencionado a lo largo de este documento. Estos materiales mantienen algunas de las propiedades interesantes del grafeno e incluso pueden ser más recomendables para según qué propósitos tengamos. Esto es debido a que, por ejemplo, el tamaño y la forma de los copos de grafeno influyen en sus propiedades. Aunque generalmente son creados de un modo aleatorio.

⁹⁰ GEIM A. K. NOVOSELOV K. S. et al. “Control of graphene’s properties by reversible hydrogenation” **University of Manchester**.

⁹¹ MERTENS, Ron. *The Graphene Handbook*. 2016

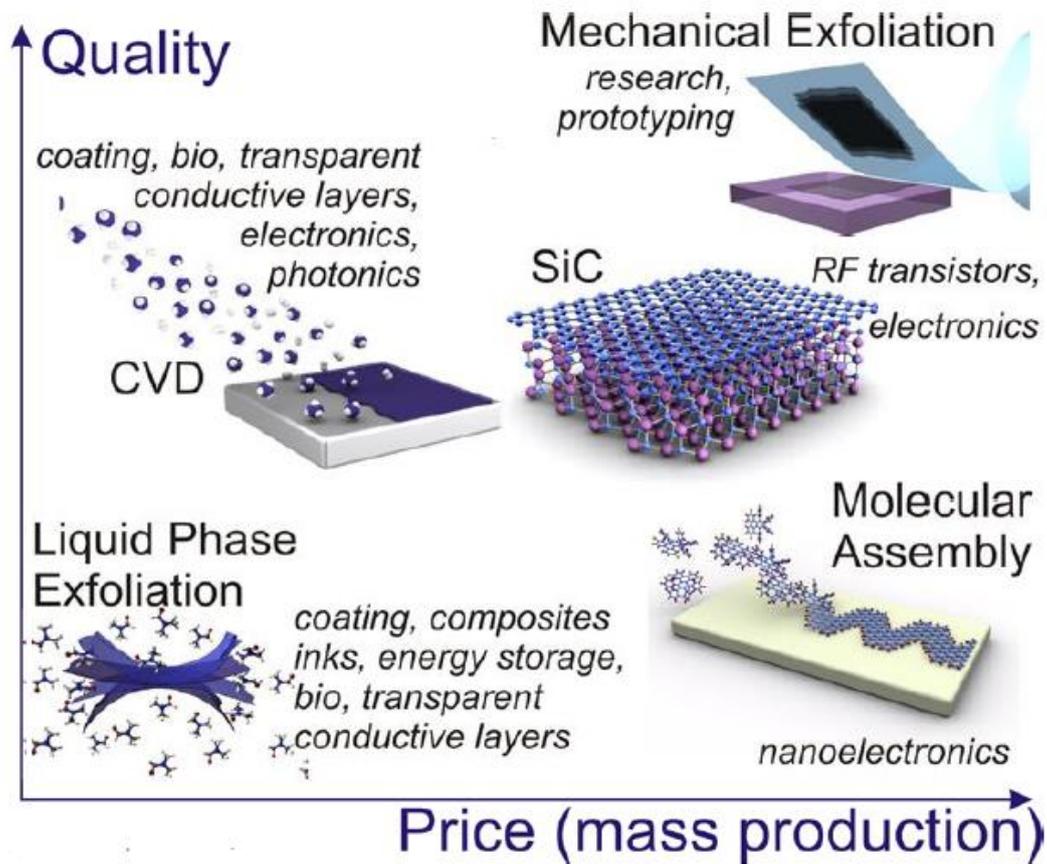


Figura 36. Algunos de los modos más utilizados a la hora de fabricar grafeno atendiendo a la cantidad y a la calidad del mismo. Imagen extraída de la Universidad de Manchester.

Como hemos mencionado, dentro de las alternativas a una capa de grafeno de alta calidad, tenemos los copos de grafeno (figura 37), las nanoplaquetas de grafeno (figura 38), las nanocintas de grafeno (figura 39) y los puntos cuánticos de grafeno (figura 40).

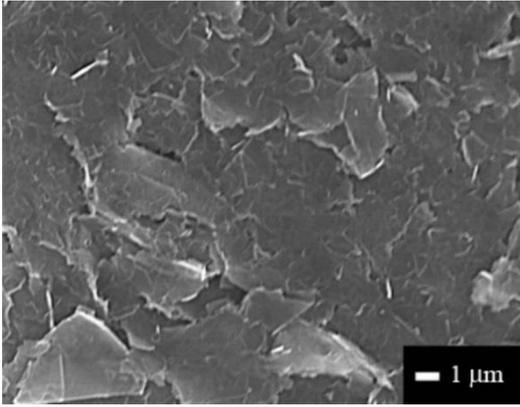


Figura 37. Copos de grafeno o Graphene flakes. En teoría se les puede dar la forma y el tamaño deseado, pero en la práctica es muy complicado. Por lo que las formas y tamaños se hacen de forma aleatoria. Imagen extraída de Graphene Supermarket.

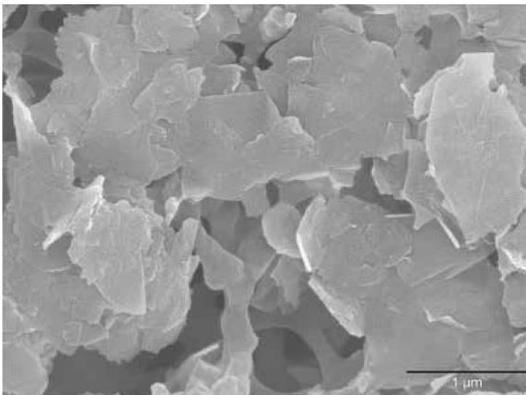


Figura 38. Nanoplaquetas de grafeno o GNPs por sus siglas en inglés. En teoría, las nanoplaquetas de grafeno deberían tener forma de disco (siendo un tipo de copo de grafeno) Sin embargo, en la práctica, no tienen dicha forma y algunas alcanzan las 38 capas. Por lo que sería más apropiado denominarlas en esos casos "nanoplaquetas de grafito". Imagen extraída de XG Sciences.

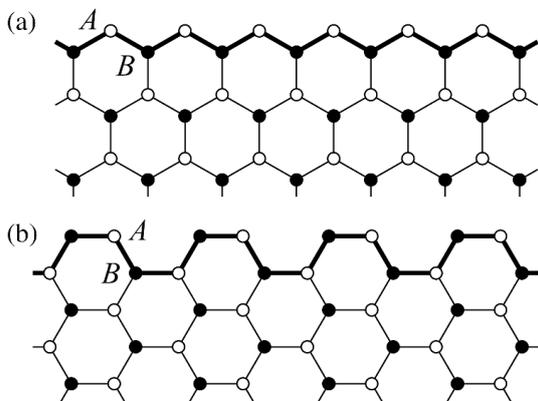


Figura 39. Nanocintas de grafeno o Graphene nanoribbons (GNRs) Son tiras de grafeno por debajo de los 50 nm. La clave está en sus bordes, que pueden terminar en zing-zag (a) o en "brazo de silla" (b). Las nanocintas pueden comportarse como metales, semimetales, semiconductores, ferromagnéticas y antiferromagnéticas. Sus propiedades dependen del tamaño, forma, longitud, etc. Una de sus aplicaciones es la de secuenciar a gran velocidad el ADN. Imagen de "Electronic band structure and magnetic states of zigzag graphene nanoribbons: quantum chemical calculations" Nikolai A. Poklonski et al.

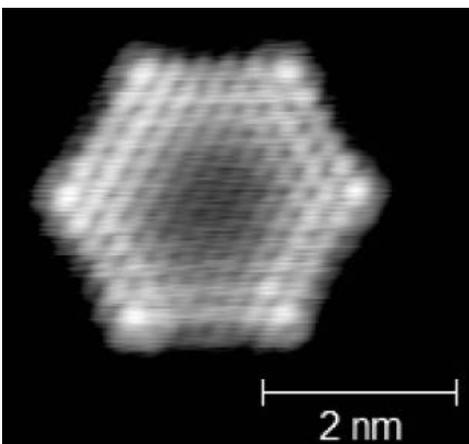


Figura 40. Los puntos cuánticos de grafeno o Graphene quantum dots (GQDs) son pequeños semiconductores con propiedades que se sitúan entre la mayoría de semiconductores y las moléculas discretas. Sus aplicaciones se investigan y su aplicación comercial queda un poco lejos. Imagen de "The Graphene handbook" Ron Mertens.

El grafeno y sus derivados tienen propiedades muy revolucionarias, pero la dificultad de fabricarlo a gran escala encarece el producto. Para hacernos una idea de esta desventaja veamos la cotización del cobre a fecha de 9 de marzo de 2017, dicha cotización ronda entre 2.55 y 2.60 dólares la libra (0.45 kg)⁹². Pues bien, Graphenea⁹³—una de las mayores empresas dedicadas a producir grafeno de alta calidad—ofrece un gramo de óxido de grafeno reducido por 97 dólares. Sin duda es un gran desequilibrio.

MANEJO DEL GRAFENO

Manejar el grafeno es problemático. La razón es que, si se juntan varias capas de grafeno, éstas tienden a desarrollar fuerzas de Van der Waals y a reestructurarse en forma de grafito. Por lo general, el grafeno es producido sobre un sustrato como el cobre, y de ahí puede ser llevado al sustrato final. No sin antes bajo un gran control.

Por otro lado, si miramos a los copos de grafeno y nanoplaquetas, hay que tener cuidado con ellas ya que, como cualquier nanopartícula, puede ser dañina la salud si se inhala. Por dicha razón los copos de grafeno son generalmente vendidos en una disolución.

Quizá una posible solución al alto coste de fabricación y manejo de grafeno pase por incorporar su fabricación en un módulo en la cadena de producción de dispositivos electrónicos tal y como investiga IBM⁹⁴. De ser así, muchas de las actuales empresas dedicadas a la fabricación de grafeno podrían verse amenazadas.

ESTANDARIZACIÓN

Éste es otro problema relacionado con los materiales de grafeno. ¿A qué se le llama “pocas capas de grafeno”? El grafeno consiste en una única capa de átomos de carbono y el grafito en varias. Por cierta convención, se acepta que hasta 10 capas podemos hablar de grafeno, pero ya hemos visto que las propiedades de una única capa difieren a las de dos. ¿A qué llamar exactamente copos de grafeno y nanoplaquetas? Las nanoplaquetas son un tipo de copo de grafeno, pero algunas empresas como XG Science las venden con ese nombre a pesar de que no tienen forma de disco. Por otro lado, los copos de grafeno se fabrican de modo aleatorio, por lo que una tanda de copos difiere de otra.

Algunas empresas venden su grafeno como de “alta calidad” pero existen muchos métodos de fabricación que influyen en la calidad del grafeno. Puedes fabricar una capa de grafeno con mayores o menores defectos, fabricar una o “varias” capas de grafeno, distintas formas de copos de grafeno de mayor y de menor calidad, etc. ¿Cómo estandarizarlo? La falta de estandarización no es ninguna cuestión baladí ya que, al haber tanta variedad de materiales de grafeno, los investigadores de distintos

⁹² <http://www.tradingeconomics.com/commodity/copper>

⁹³ <https://www.graphenea.com/collections/graphene-oxide/products/reduced-graphene-oxide-1-gram>

⁹⁴ MARTIN-GAGO, José Ángel *et al*: *El nanomundo en tus manos*. Crítica.

campos pueden utilizar erróneamente un tipo de grafeno para sus investigaciones y descartar prematuramente el grafeno como posible solución.

ASPECTO SOCIOECONÓMICO

Ya hemos visto en la *figura 32* que, desde su aislamiento y experimentos, el grafeno ha desencadenado una avalancha de artículos relacionados con él. No en vano, ante tales propiedades físicas y químicas, el grafeno trae consigo una enorme cantidad de promesas para las siguientes revoluciones tecnológicas. Y es que el grafeno ha abierto la puerta a los llamados “materiales bi-dimensionales” que pueden enriquecer a muchos sectores.

Las promesas del grafeno han provocado una explosión del número de patentes. Ver *figura 41*. Curiosamente, no es ningún país europeo o norteamericano quien encabeza la lista de patentes; sino que China⁹⁵ se pone a la cabeza en ella. Ver *figura 42*.

También es interesante señalar que son las firmas asiáticas las que más peso tienen a la hora de realizar trabajos con el grafeno. Ver *figura 43*.

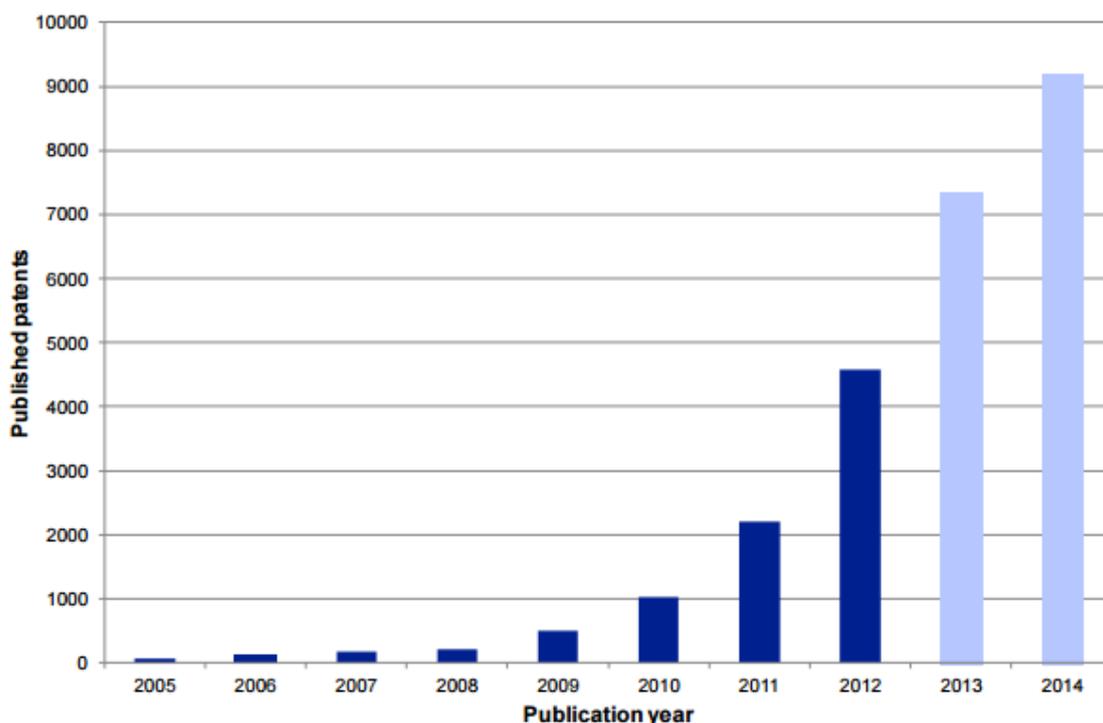


Figura 41. Número de patentes por año a lo largo del mundo sobre el grafeno. Fuente: UK Intellectual Property Office: Graphene The worldwide patent landscape in 2015

⁹⁵ Una razón para que China esté en la cabeza es porque es el primer país en producir grafito y el segundo (después de Brasil) en reservas de grafito. Consultar www.statista.com

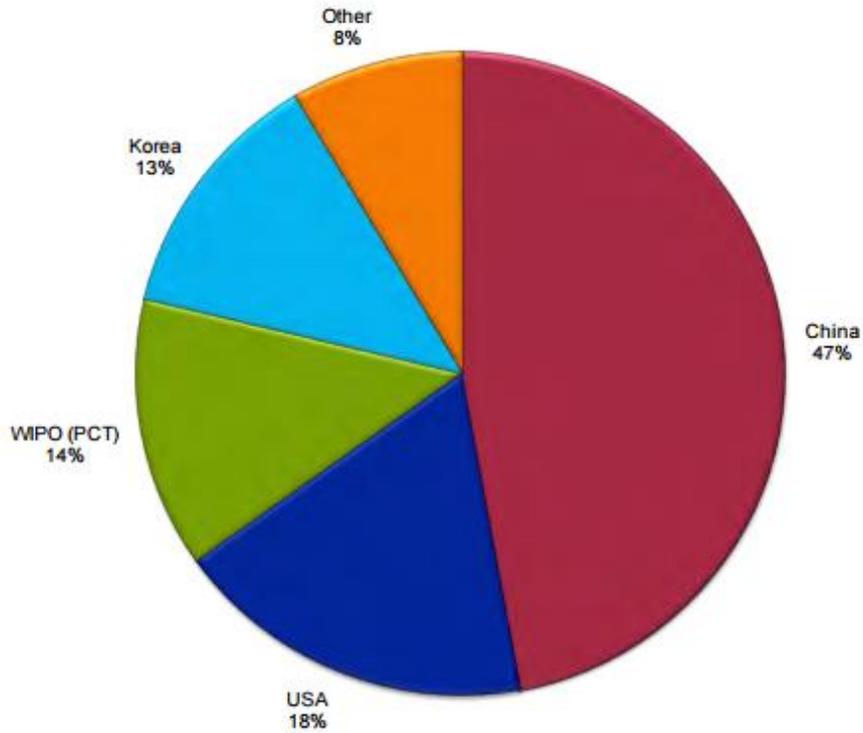


Figura 42. La mayoría de las patentes provienen de China. Fuente: UK Intellectual Property Office: Graphene The worldwide patent landscape in 2015

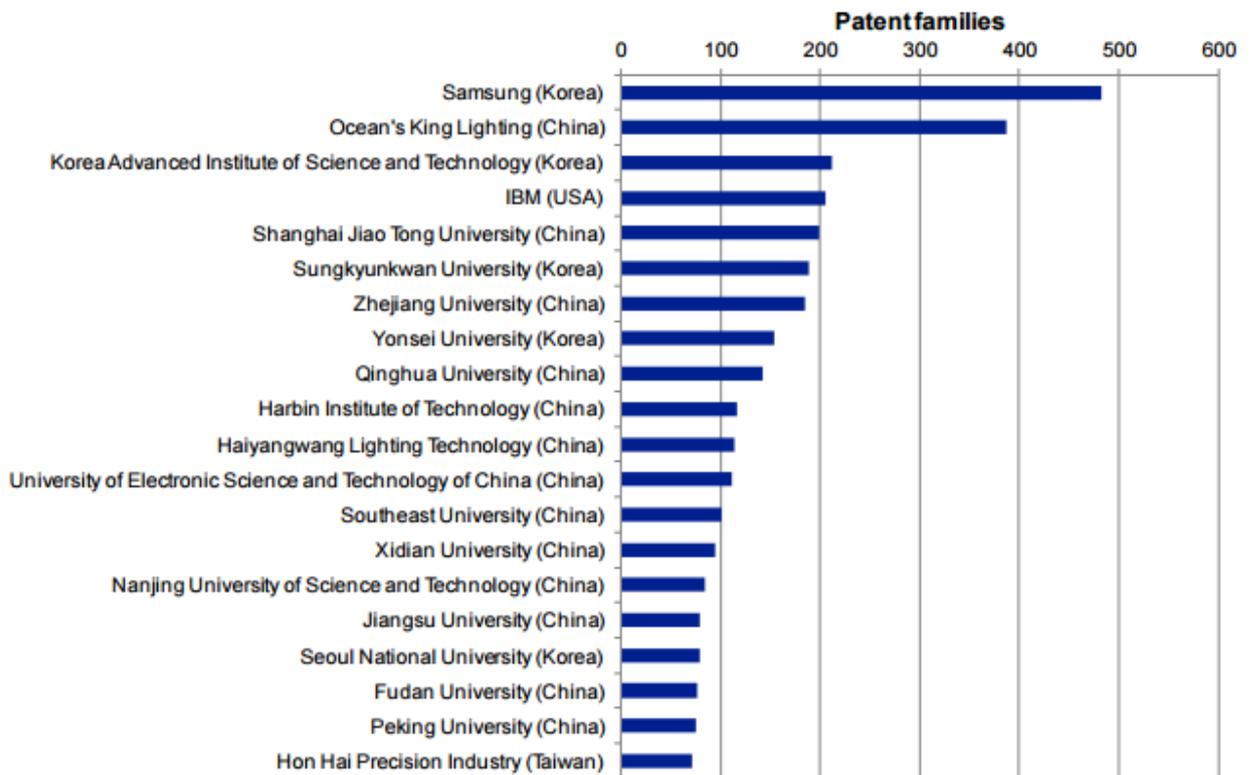


Figura 43. Las empresas asiáticas están a la cabeza en el desarrollo y aplicación del grafeno. Fuente: UK Intellectual Property Office: Graphene The worldwide patent landscape in 2015

Existen muchas iniciativas a la hora de investigar el grafeno y cómo aplicar sus propiedades. Sin duda, el proyecto más ambicioso es el proyecto europeo “**Graphene Flagship**”⁹⁶. En octubre de 2013 nació este proyecto que contará con hasta mil millones de euros repartidos en diez años para desarrollar las aplicaciones del grafeno en computación, baterías y sensores. Dicho proyecto está capitaneado por el físico teórico Jari Kinaret de la Universidad Chalmers de Suecia. La iniciativa europea cuenta con más de 150 grupos de investigación académicos e industriales de 23 países. Además, el proyecto cuenta con un número creciente de miembros asociados que se incorporarán a los paquetes de trabajo científico y tecnológico de la fase Horizonte 2020 (1 de abril de 2016 a 31 de marzo de 2018).

El segundo proyecto sobre el grafeno del mundo por envergadura lo presenta el Reino Unido. Como hemos visto en el documento, Geim y Novoselov aislaron y experimentaron con grafeno en la Universidad de Manchester. Ésta institución sigue siendo hoy en día una de las líderes mundiales en investigación sobre el grafeno⁹⁷. El Reino Unido es consciente del potencial que tiene el grafeno y planea crear una especie de “Graphene Valley”. Para ello ya ha adelantado más de 356 millones de libras en tres fases: Un primer proyecto⁹⁸ con 61 millones de libras llamado **National Graphene Institute**. Dicho proyecto está dedicado a construir un nuevo edificio y equipo junto a la Universidad de Manchester. Un segundo proyecto⁹⁹ con 60 millones de libras, el **Graphene Engineering Innovation Center (GEIC)**. El objetivo del GEIC es desarrollar productos basados en grafeno para su comercialización. El tercer proyecto, dotado de 235 millones de libras es el **Sir Henry Royce Institute for Advanced Materials Research and Innovation**¹⁰⁰. Dicha iniciativa está enfocada en el estudio de nuevos materiales aparte del grafeno.

Otra interesantísima iniciativa¹⁰¹, esta vez privada, proviene de **IBM**. El gigante tecnológico cree que se están alcanzando los límites del silicio, por lo que invertirán 3 mil millones de dólares (entre 2015 y 2019) en buscar alternativas al silicio. Entre ellas el grafeno.

⁹⁶ <http://graphene-flagship.eu/>

⁹⁷ UK Intellectual Property Office: Graphene The worldwide patent landscape in 2015

⁹⁸ <http://www.graphene.manchester.ac.uk/collaborate/national-graphene-institute/>

⁹⁹ <http://www.graphene.manchester.ac.uk/collaborate/geic/>

¹⁰⁰ <http://www.graphene.manchester.ac.uk/explore/graphene-city/sir-henry-royce-institute/>

¹⁰¹ <https://www-03.ibm.com/press/us/en/pressrelease/44357.wss>

El grafeno despierta gran interés y a fecha de hoy se estima que se han invertido 2,4 mil millones de dólares en investigación. Sin embargo, en 2013 sólo se vendió grafeno por un valor de 12 millones de dólares. Y las expectativas de Lux Research para 2025 son de un mercado valorado en sólo 349 millones de dólares. *Ver figura 44.* Según Lux Research¹⁰², el grafeno no sería tan revolucionario para el mercado como el silicio, sino más bien se asemeja a la “fiebre del oro” o “burbuja” que ocurrió cuando se desarrollaron los nanotubos de carbono.

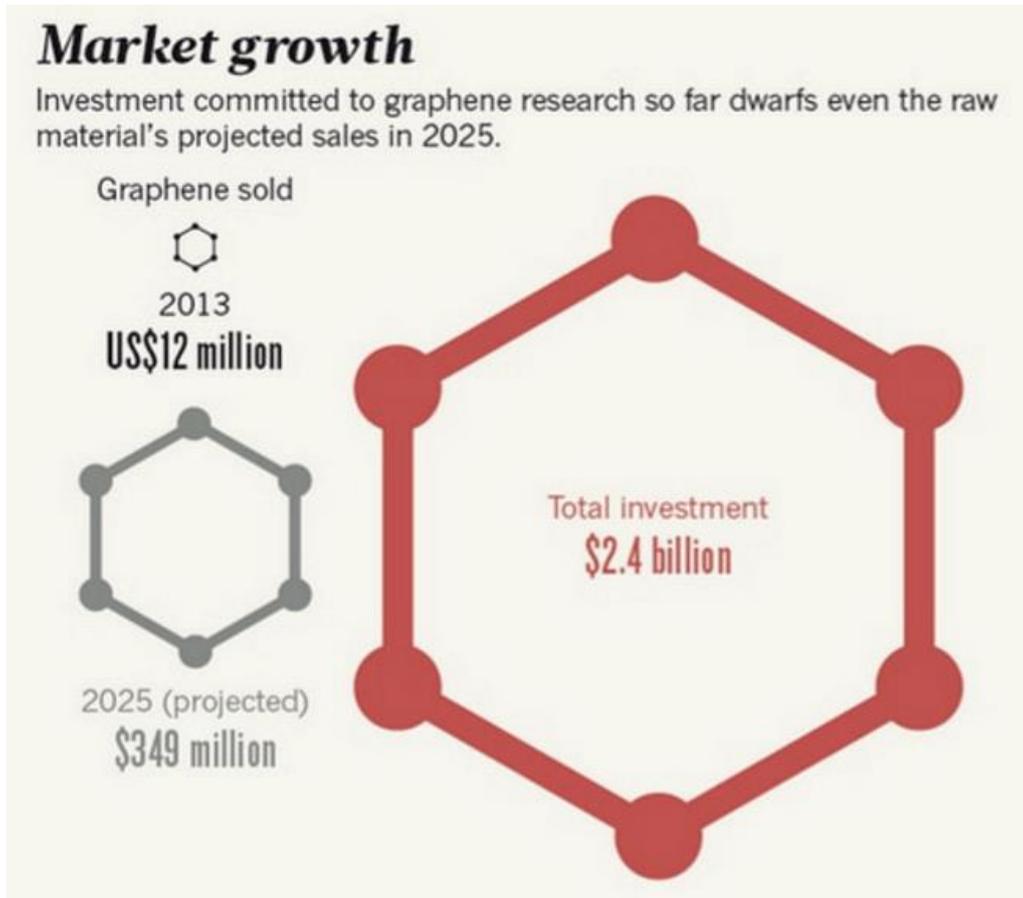


Figura 44. Proyección de mercado del grafeno según Lux Research.

En una línea semejante se mueve la auditora Deloitte¹⁰³, quien prevé que el mercado irá poco a poco incorporando materiales con grafeno. Sin embargo, estima que el mercado del grafeno apenas supere los 100 millones de dólares para el final de la década. IDTechEx Research proyecta que el mercado de grafeno crecerá hasta los 220 millones de dólares en 2026. Para IDTechEx, el mercado de las plaquetas de grafeno será mayor que el de las hojas de grafeno. *Ver figura 45.*

¹⁰² <http://blog.luxresearchinc.com/blog/2015/07/case-closed-graphene-is-the-next-carbon-nanotube/>

¹⁰³ <https://www2.deloitte.com/global/en/pages/technology-media-and-telecommunications/articles/tmt-pred16-tech-graphene-research-now-reap-next-decade.html#full-report>

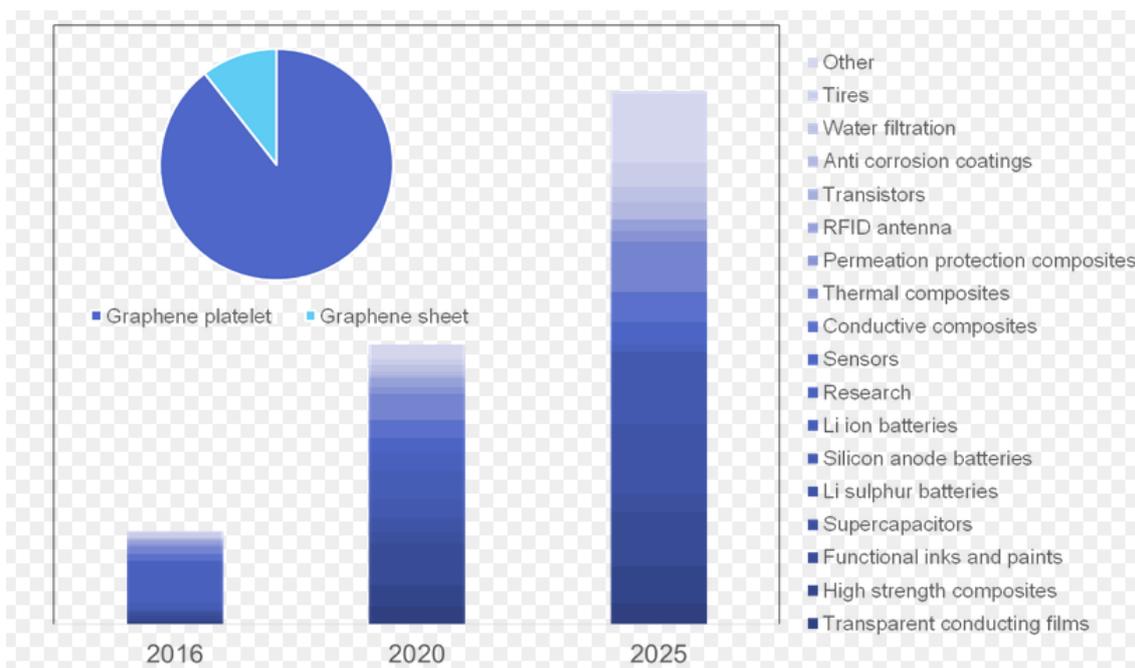


Figura 45. Proyección mercado de nanoplaquetas y hojas de grafeno según IDTechEx

En una línea parecida a IDTechEx se encuentra Grand View Research¹⁰⁴, quien cree que el mercado está copado por las nanoplaquetas de grafeno y el óxido de grafeno. Ver figura 46.

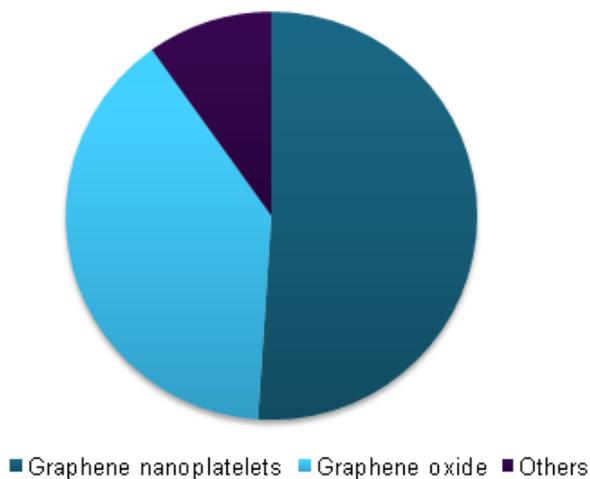


Figura 46. Las nanoplaquetas y el óxido de grafeno copan el mercado del grafeno en 2015, según Grand View Research.

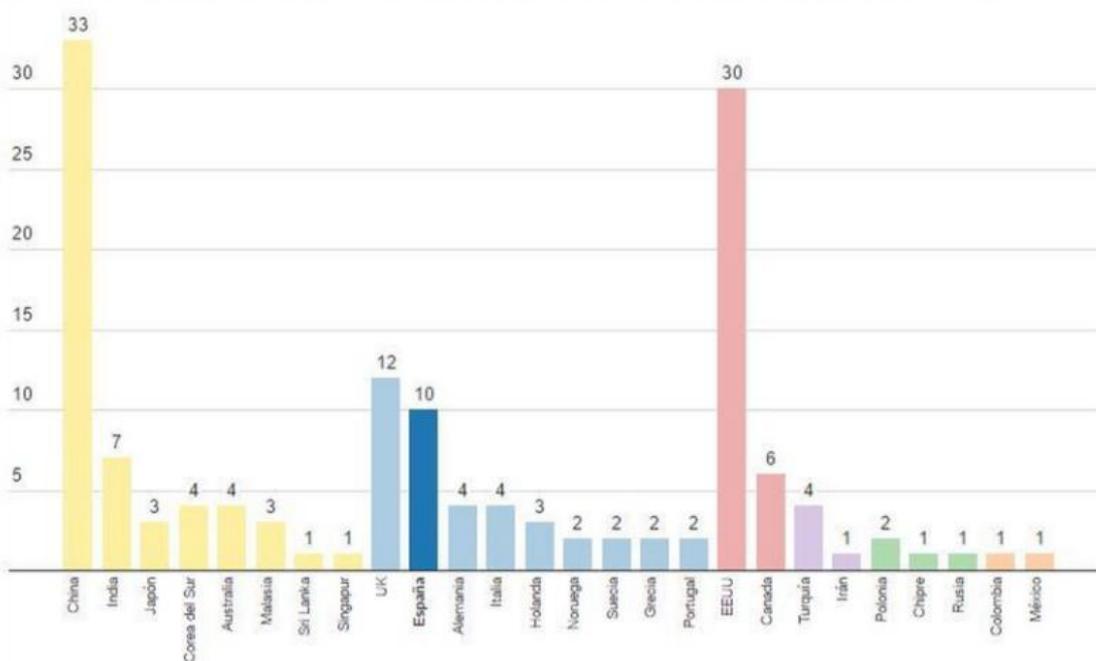
¹⁰⁴ <http://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/graphene-industry>

EL GRAFENO EN ESPAÑA

El grafeno ha provocado un gran impacto en el mundo tecnológico y España no sale mal parada en el panorama internacional. Resulta que España es el cuarto productor mundial de grafeno en términos absolutos. Tan sólo por detrás de China, Estados Unidos y Reino Unido. *Ver figura 47.* Sin embargo, si ajustamos la producción de grafeno al PIB, España es el principal productor mundial. *Ver figura 48.*

Productores de grafeno por país en 2017

Número de productores de grafeno por país y región recogidos en el Graphene Report. En amarillo la región Asia-Pacífico, en azul Europa Occidental, en rojo Norteamérica, en morado Oriente Medio, en verde Europa del Este y en naranja Sudamérica.



Source: The Graphene Council | El Español

Created with [Datawrapper](#)

Figura 47. España es el cuarto productor mundial de grafeno. Fuente: The Graphene Council|El Español

Producción de grafeno en función del tamaño del país

Productores de grafeno en función del Producto Interior Bruto según datos recopilados por la ONU.



Source: Naciones Unidas | El Español

Created with [Datawrapper](#)

Figura 48. En función del PIB, España es el principal productor de grafeno a nivel mundial. Fuente Naciones Unidas | El Español.

Que España sea uno de los principales productores de grafeno a nivel mundial no es ninguna casualidad. En España encontramos empresas como las siguientes:

- **Graphenea:** Se trata de una de las empresas más importantes dedicadas al grafeno. La empresa guipuzcoana está enfocada en la producción de grafeno de alta calidad para aplicaciones industriales. Esta empresa es uno de los principales suministradores de grafeno para el Graphene Flagship¹⁰⁵.
<https://www.graphenea.com/>
- **Avanzare:** Esta empresa riojana produce óxido de grafeno y copos de grafeno además de otros materiales.
<http://www.avanzare.es/>
- **Graphene Nanotech:** La empresa GPNT surge originariamente de la colaboración entre inversores privados e investigadores pertenecientes al Instituto de Ciencia de Materiales de Aragón (ICMA), el Instituto de Nanociencia de Aragón (INA), y el Centro Nacional de Microelectrónica de Barcelona (CNM). Graphene Nanotech es una de las compañías distinguidas con el sello “Spin Off” de la Universidad de Zaragoza. La empresa zaragozana está enfocada en la producción de grafeno mediante crecimiento epitaxial de carburo de silicio.
<http://www.gpnt.es/es/>
- **NanoInnova Technologies:** Es una empresa spin-off de la Universidad Autónoma de Madrid. Se encuentra ubicada en el Parque Científico de Madrid, en una de las áreas de negocio científicos más dinámicas del norte de la ciudad. La empresa está enfocada en la producción de óxido de grafeno y nanoplaquetas de grafeno.
<http://www.nanoinnova.com/>
- **Gnanomat:** Otra empresa madrileña es Gnanomat. Esta compañía desarrolló un procedimiento en fase líquida para exfoliar grafito y convertirlo en grafeno. El proceso, de un solo paso y que utiliza solventes biodegradables baratos, produce microplaquetas de grafeno de alta calidad.
<http://www.gnanomat.com/>

¹⁰⁵ <https://www.graphenea.com/pages/graphene-manufacturer-producer-supplier>

Pero España no sólo tiene peso en el grafeno por sus empresas. El Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) cuenta entre sus miembros a investigadores como **Francisco Guinea**, colaborador en varias ocasiones de Andre Geim y Konstantin Novoselov, y **Mar García-Hernández**, quien lidera las investigaciones sobre el grafeno en España y colabora en el proyecto Graphene Flagship. También existen en España centros que estudian el grafeno junto a otros nuevos materiales. Es el caso del Instituto de Ciencias Fotónicas (ICFO) y el Instituto Catalán de Nanociencia y Nanotecnología (ICN), el Nanogune de San Sebastián, el Instituto Madrileño de Estudios Avanzados (IMDEA) y la Universidad Autónoma en Madrid.

También podríamos mencionar—después de una larga lista—a los jóvenes profesores e investigadores **Tomás Palacios** y **Pablo Jarillo-Herrero**, quienes lideran investigaciones sobre el grafeno en el Massachusetts Institute of Technology (MIT). Ambos investigadores han sido galardonados, recibiendo Pablo Jarillo-Herrero el Premio Presidencial a Jóvenes Investigadores Científicos (PECASE).



Figura 49. Un gramo de óxido de grafeno reducido ofrecido por la empresa española Graphenea.

EPÍLOGO

A lo largo del documento hemos ido desvelando la larga historia del grafeno. Un material que irrumpió en 2004 con tal fuerza que a sus descubridores les valió el Nobel de Física en 2010. Pero no todo empieza y acaba con el grafeno, sino que, más bien el grafeno abrió las puertas a un nuevo mundo de materiales que pueden convertir la ciencia ficción en realidad. No sólo contaremos con el grafeno, sino que también se desarrollan materiales como el *disulfuro de molibdeno*, que tiene aplicación en electrónica, catalización o como lubricante; la *perovskita*, interesante para placas solares; el *nitruro de boro* (grafeno blanco) utilizado en cosmética; el *siliceno*, que conduce la electricidad más rápido que cualquier otro semiconductor en el mercado y que puede emplearse como una “evolución” del silicio; el *germanano*, que conduce electrones diez veces más rápido que el silicio y ya se aplica en fibra óptica; el *Shrilk*, un material que imita la cutícula de los insectos y puede ser sustituto del plástico por ser muy resistente y biodegradable; el *estanano*, que es un aislante topológico—es decir, que permite la conducción electrones por bordes y superficies pero no por el interior—por lo que pueden fabricarse circuitos; aerogeles... la lista es muy larga.

El grafeno no es, por tanto, el único material interesante. Deberá convivir con toda una familia de nuevos materiales que revolucionarán sectores enteros y ayudarán a desarrollar, a su vez, otros materiales. Las carencias de unos pueden ser las fortalezas de otros, por lo que pueden ser combinados para cubrir problemas y crear algo interesante.

Sin duda España tiene peso en el mundo del grafeno. Pero no sólo a nivel empresarial, sino también a nivel de investigación y de colaboración con proyectos como el *Graphene Flagship*. Habrá que esperar si se consiguen solventar todos los problemas que impiden la comercialización¹⁰⁶ del grafeno. Ya ha pasado tiempo desde que se descubrió y los pasos dados para su aplicación han sido más bien tímidos. Sin embargo, la historia está llena de ejemplos de métodos revolucionarios que vienen a solucionar problemas que se creían imposibles. Lo que está claro es que, si no se consigue aplicar comercialmente el grafeno, lo más probable es que todo termine como le ocurrió al nanotubo de carbón: una burbuja. Pero en caso de solucionarse todos los problemas que presenta dicho material, estaríamos realmente en el comienzo de una serie de revoluciones de magnitudes inimaginables que cambiarían nuestra capacidad de acción y comprensión del mundo. España podría tener un buen futuro con los nuevos materiales.

¹⁰⁶ Existen ya algunos productos (especialmente deportivos) que incorporan grafeno. Por ejemplo, la empresa HEAD comercializa algunas raquetas de tenis y esquís con grafeno. O la española Catlike, que ofrece cascos y zapatos de ciclista con grafeno.

Agradecimientos

Quisiera agradecer al profesor Manuel A. Sellés García su guía y ayuda para elaborar este TFG. También me gustaría agradecer a mi amigo Arturo del Toro Saravia y a Juan Francisco Muñoz Martínez sus correcciones y comentarios. Cualquier error en el documento es de mi entera responsabilidad.