GRAFENO: CONCEPTO Y APLICACIONES

Darío Gallach Pérez
Escuela de Arquitectura, Ingeniería y Diseño
UNIVERSIDAD EUROPEA DE MADRID

El grafeno es un material novedoso que, aunque ya se teorizaba con él hace más de setenta años por las curiosas características que prometía tener, no se pudo aislar para su estudio y aplicación hasta principios de este siglo. Desde entonces, numerosos grupos científicos investigan, desde un punto de vista teórico y experimental, sus propiedades fisicoquímicas y las que pueden darse por la combinación consigo mismo y con otros materiales. Estos estudios (especialmente aquellos relacionados con su fabricación de alta calidad y en grandes láminas), han despertado el interés de la industria y han hecho que encontrar dispositivos o materiales basados en grafeno en nuestro día a día sea cada vez más común. Para comprender la razón por la cual este material es tan especial, es necesario entender primero qué es y cuáles son las propiedades fundamentales que le hacen tan prometedor en un sinfín de aplicaciones (de las cuales se comentarán algunas actuales y otras futuras). Por eso, el texto se ha estructurado procurando que el lector obtenga una introducción guiada que le permita no sólo comprender el material en sí, sino también aportarle los fundamentos y algunos ejemplos para buscar sus propias aplicaciones en su entorno más inmediato.

PALABRAS CLAVES •
grafeno, propiedades, aplicaciones, materiales 2D

CÓMO CITAR ESTE ARTÍCULO •
Gallach Pérez, Darío. 2020. "Grafeno: concepto y aplicaciones" en: UEM STEAM Essentials

INTRODUCCIÓN

Empecemos imaginando un material que sea un excelente conductor de la electricidad. Seguramente hayamos pensado en un metal, donde algunos electrones son libres de moverse por todo su volumen. Ahora, pensemos que ese material también tiene que ser extremadamente ligero y flexible. En ese caso, la complejidad del problema ha aumentado considerablemente y podríamos pensar en algún tipo de polímero conductor. Además, nuestro material tiene que ser más duro que el diamante. En este caso, la respuesta parece bastante más compleja y es posible que nos hayamos imaginado un material extraño, cuya síntesis sólo puede ser posible en un sofisticado laboratorio científico.

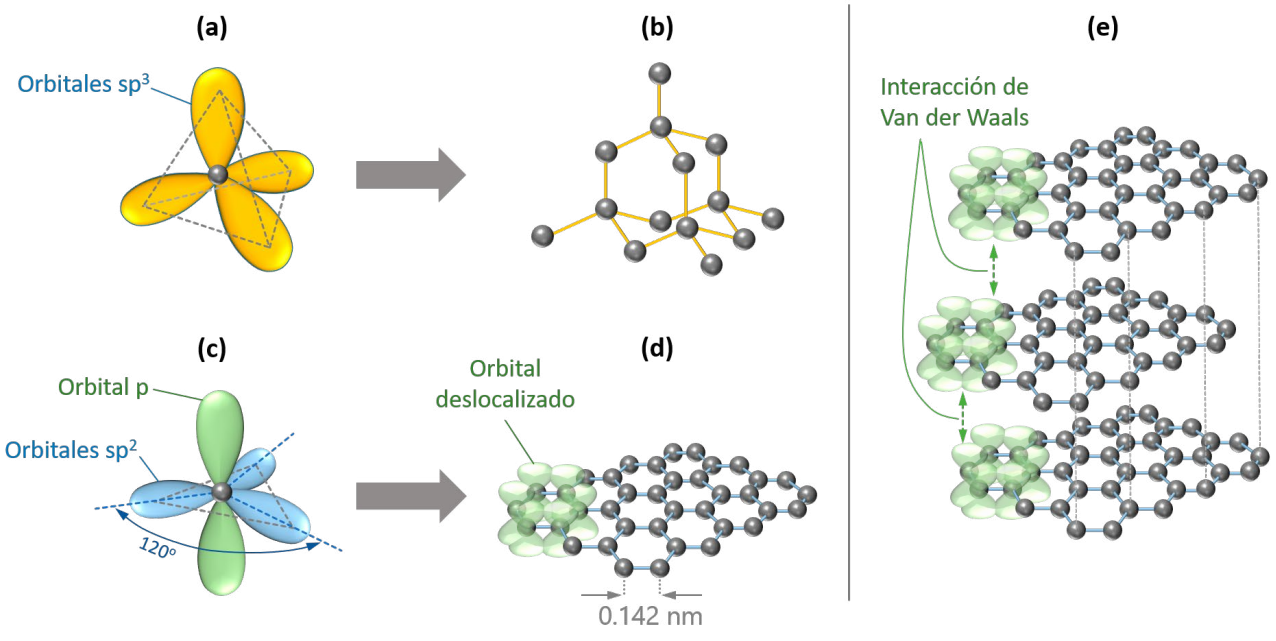
Sin embargo, no podemos estar más lejos de la realidad, ya que ese material es, de hecho, bastante común y lo hemos tenido en nuestras manos, por ejemplo, cuando hemos cogido un lápiz de grafito. Cuando escribimos o dibujamos con este objeto, lo que hacemos es ir dejando rastros im-

portantes de ese material. ¿Cómo es posible que hayamos tenido tan cerca (¡en nuestras manos!) el material del futuro desde hace tanto tiempo y no nos hayamos dado cuenta de ello? En este momento, es posible que afloren las dudas, porque precisamente por haber estado desde la niñez empleando lápices, sabemos bien que el grafito es muy frágil y no es capaz de hacerle la más mínima muesca al diamante, por lo que puede parecer que estamos en una contradicción. Para salir de ella, debemos entender primero de qué está hecha la mina de un lápiz.

El *carbono* (C) es el sexto elemento de la tabla periódica y nos lo encontramos en la naturaleza en forma de *diamante o grafito (formas alotrópicas)*. Del primero, todos sabemos que, aparte de ser bastante caro, tiene una dureza extrema, pero su conductividad eléctrica es muy baja. El grafito, sin embargo, es un material muy blando, por lo que se deshace con facilidad (por eso un lápiz escribe tan bien en un papel) y su conductividad eléctrica es muy elevada. ¿A qué se deben estos cambios, si ambos materiales, al fin y al cabo, están hechos de carbono? La respuesta es a cómo los átomos están colocados en el espacio y a cómo están unidos entre sí, que es lo que llamamos en física del estado sólido la *red cristalina* y el *enlace*. Aquí juega un papel primordial la *estructura electrónica* de los átomos participantes, que en el caso del átomo de carbono es aún más especial, porque tiene la capacidad de *hibridarse*.

La *configuración electrónica* de cualquier átomo neutro de carbono en su estado fundamental es $1s^2 2s^2 2p^2$. Esto quiere decir que hay dos electrones en el nivel de energía 1, *orbital 1s* (un orbital es una región del espacio donde tenemos una probabilidad muy alta de encontrar al electrón) y cuatro electrones en el nivel de energía 2, dos de ellos en el orbital 2*s* y otros dos en el 2*p*. Estos cuatro electrones se pueden reorganizar (con un pequeño aporte de energía) en *orbitales híbridos* que permiten establecer diferentes geometrías moleculares. En el caso del diamante, los átomos de carbono poseen una hibridación sp^3, en la que un electrón del orbital *2s* se combina con los tres posibles orbitales *p* para dar lugar a cuatro orbitales híbridos $2sp^3$ formando un tetraedro con un electrón en cada uno de ellos (Figura 1a). Estos electrones están dispuestos a formar un *enlace covalente* simple que recibe el nombre de *enlace sigma* (σ) y que es rígido y muy fuerte. En el caso del diamante, este enlace se produce entre átomos de carbono y caracteriza su estructura cristalina, otorgándole las propiedades físicas que hemos comentado (Figura 1b). Por otro lado, en la hibridación sp^2, se combina el orbital *s* con sólo dos orbitales *p* de los tres posibles para dar lugar a tres orbitales híbridos $2sp^2$ contenidos en un plano y separados entre ellos por 120º (Figura 1c). Observa que, en este caso, hay un electrón en un orbital *p* que, puede establecer otro enlace llamado *enlace pi* (π) y que permite al electrón estar por encima y por debajo del plano donde se producen los enlaces sigma. Si ahora unimos un gran número de átomos de carbono con hibridación sp^2, formarán un plano de hexágonos y obtendremos una lámina de *grafeno*, que es el material tan especial que se había mencionado al principio (Figura 1d). La unión entre átomos de carbono tiene lugar a través de los fuertes enlaces sigma de los orbitales hibridados, lo que dota al grafeno de su resistencia y, como se trata de una superficie con el espesor de un átomo, también muestra una elevada flexibilidad. Por otro lado, los orbitales *p* no hibridados que quedan por encima y por debajo del plano son todos iguales y trabajan como un único *orbital deslocalizado* (en la Figura 1d se ha representado este orbital sólo en un

Figura 1 » **(a)** Esquema de la hibridación sp^3 del átomo de carbono. **(b)** Estructura cristalina del diamante. **(c)** Esquema de la hibridación sp^2 del átomo de carbono, donde se ha representado el orbital *p* no hibridado. **(d)** Estructura cristalina del grafeno. **(e)** Estructura cristalina del grafito. En **(d)** y en **(e)** se ha omitido la representación de los orbitales deslocalizados por simplicidad. **Fuente: elaboración propia.**



hexágono por claridad) por el que los electrones se pueden mover con libertad por toda la lámina de grafeno, lo que explica su elevada conductividad eléctrica. Este orbital deslocalizado, refuerza los enlaces sigma y dota al grafeno de una dureza superior a la del diamante.

¿Y el grafito? ¿No decíamos que el grafeno se encontraba en el grafito de un lápiz? Si ahora apilamos muchas láminas de grafeno, unas sobre otras, siguiendo un patrón característico obtendremos grafito (Figura 1e). En este material, al acercar unas láminas de grafeno con otras, las nubes de electrones deslocalizados interactuarán con las de las láminas que haya encima o debajo a *través de fuerzas de Van der Waals* (Figura 1e), que hacen que queden muy débilmente ligadas las unas con las otras. Por eso, el grafito es un material tan blando y se deshace con tanta facilidad cuando escribimos con un lápiz sobre un papel, dejando un rastro de conjuntos de láminas de grafeno a su paso. Además, los electrones del orbital deslocalizado de cada lámina de grafeno que forma el grafito permiten una excelente conductividad eléctrica paralela al plano, al contrario que lo que ocurre con la conducción perpendicular entre orbitales deslocalizados, que es mil veces menor.

Sobre las láminas de grafeno se lleva teorizando desde 1947, cuando se calcularon por primera vez sus bandas de energía. A pesar de ser un material que prometía ser de gran interés práctico, ni su estudio experimental, ni sus aplicaciones eran posibles por aquel entonces, ya que no se sabía cómo aislar una sola lámina de grafeno y no se supo hasta 60 años después. Esto cambió cuando en el año 2004, A. Geim y K. Novoselov utilizaron una cinta adhesiva para adherirla a la superficie de un trozo de grafito y así desprender una porción al tirar de ella. Al repetir esta operación algunas veces más sobre la muestra recogida, obtuvieron la primera muestra de grafeno para comenzar con su estudio experimental y les supuso ganar el Premio Nobel de Física del año 2010. Esta técnica, que parece tan simple, se llama *exfoliación mecánica* y es el resultado de un profundo estudio de prueba y error, donde se vio que la cinta adhesiva tiene una particular afinidad por pequeños pedacitos de grafito y, además, es muy fácil de disolver, haciendo que el proceso de aislar una lámina de grafeno sea relativamente sencillo.

Desde su descubrimiento, numerosos grupos de investigación han estudiado sus extraordinarias propiedades en detalle mientras que, al mismo tiempo, se ha trabajado en sus aplicaciones industriales. Tales han sido las promesas que han surgido en torno a este material, que la Unión Europea decidió lanzar en el año 2013 la mayor iniciativa científica de su historia, llamada *Graphene Flagship*, cuyo objetivo es implantar el grafeno en la industria en un plazo de diez años. En la más reciente actualidad, las posibilidades del grafeno se han multiplicado al combinarlo consigo mismo y con otros materiales para dar lugar a aún más asombrosas propiedades y ha iniciado el campo de investigación de los materiales 2D que traerán consigo, sin ninguna duda, una revolución a nivel científico y tecnológico.

PROPIEDADES DEL GRAFENO

Hasta ahora, hemos mencionado algunas de las propiedades que se pueden deducir directamente de la estructura cristalina del grafeno. Aun así, hay muchas más propiedades que se han ido descubriendo experimentalmente y otras que posiblemente estén aún por conocerse. A continuación, se mencionan las principales:

- » **Excelente conductor de la electricidad.** Esta propiedad llama particularmente la atención porque, aunque el grafeno no es un metal, desde el punto de vista de la conductividad eléctrica actúa como tal. Los electrones que se encuentran en las regiones de orbitales deslocalizados se mueven con libertad por la estructura como *cuasipartículas* con masa efectiva nula. Esto hace que el grafeno tenga una conductividad eléctrica de $0{,}96 \cdot 10^{6}\ \Omega^{-1} \cdot m^{-1}$ (Royal Academy of Sciences, 2010), que es aproximadamente un 66% más elevada que la del cobre y un 57% más que la de la plata, siendo ambos los metales con mejor conductividad eléctrica. La libertad con la que se mueven los electrones también permite hacerlos oscilar a muy alta frecuencia, abriendo la posibilidad de crear dispositivos que funcionen en el régimen de los GHz (Wu, y otros, 2012).

- » **Excelente conductor del calor.** Cuando aportamos energía a una estructura atómica, los átomos que la componen pueden vibrar a determinadas frecuencias. Los enlaces que existen entre ellos actúan de una forma muy similar a muelles, por lo que el movimiento de unos átomos se puede transmitir a otros generando ondas en el material. Esto es lo que conocemos como fonones, y es la causa principal de la conductividad térmica del grafeno, que es el material con la conductividad térmica más elevada que se conoce, de 2000-4000 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ (Sang, Shin, Kim, & Yu, 2019).

- » **Extremadamente elástico y flexible.** El grafeno es un material cuyo espesor es de una monocapa, lo que hace que se pueda doblar con extrema facilidad. A su vez, los fuertes enlaces covalentes entre sus átomos permiten que mantenga su integridad estructural.

- » **Extremadamente duro y estable.** Los enlaces covalentes entre sus átomos, igual que los que tiene el diamante, junto con los orbitales deslocalizados que refuerzan la estructura, hacen que pueda ser incluso más duro que el diamante si su estructura no presenta defectos (de hecho, el diamante se descompone a altas temperaturas y a presión atmosférica en grafeno).

• » **Extremadamente resistente.** Dados sus enlaces covalentes entre carbonos, el grafeno posee una de las estructuras más fuertes que se conocen, con una tensión de rotura de 125 GPa (la del acero está en torno a los 400 MPa y la del Kevlar en 376 MPa) (Lee, Wei, Kysar, & al., 2008). Para hacernos una idea de este dato, podemos poner el mismo ejemplo que pusieron sus descubridores: una lámina de grafeno de 1 m^2 podría soportar el peso de un gato de 4 kg (¡el cual parecería estar suspendido en el aire!).

• » **Muy ligero.** El grafeno tiene una densidad teórica de 0,77 $mg \cdot m^{-2}$. Dicho de otro modo, una lámina de grafeno del tamaño de un campo de fútbol pesaría en torno a los 5 kg.

• » **Prácticamente transparente.** El grafeno es un material 2D que está formado por una sola capa de átomos. Por eso, absorbe tan sólo un 2,3% de la luz visible que lo atraviesa, lo que le hace prácticamente transparente (Nair, Blake, Grigorenko, & et al., 2008).

• » **Químicamente inerte.** Este material apenas reacciona químicamente con otros elementos o compuestos, lo que resulta de interés en cuanto a su estabilidad química y estructural, pero también ha supuesto (y supone) grandes retos a los grupos científicos que buscan modificar su estructura con el fin de cambiar sus propiedades (como, por ejemplo, convertirlo en semiconductor).

• » **Elevada superficie específica.** Se trata de un parámetro que relaciona la superficie del material y su masa. En el caso del grafeno, este dato es de aproximadamente 3500 $m^2 \cdot g^{-1}$, lo que le hace ideal para aplicaciones biomédicas que requieren grandes superficies en una cantidad mínima de material, como pueden ser la detección de moléculas o la liberación controlada de fármacos (Tadyszak, Wychowaniec, & Litowczenko, 2018).

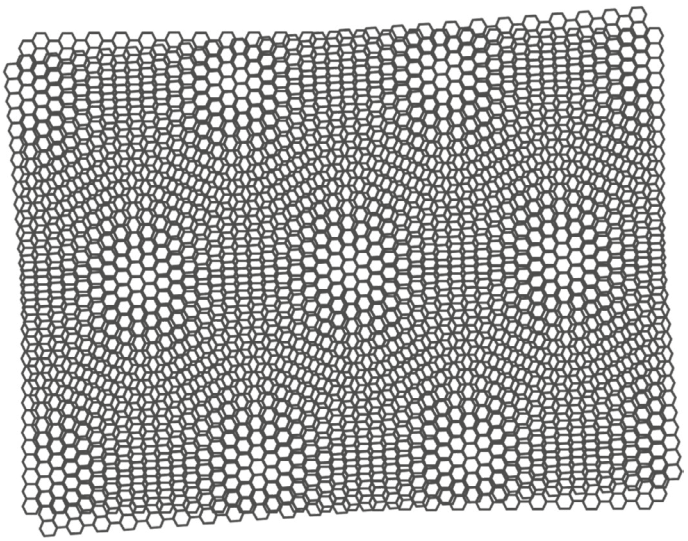
Recientemente se ha visto que al combinar el grafeno consigo mismo o con otros materiales, aparecen nuevas y sorprendentes propiedades. La más reciente ha sido el descubrimiento del fenómeno de *superconductividad* en este material. Al rotar dos láminas de grafeno superpuestas un ángulo exacto de 1,1° (conocido como "ángulo mágico") mientras se mantiene la muestra a 1,7 K, se logra que no exista resistencia alguna al paso de la corriente eléctrica. Además, al aplicar un campo eléctrico, se puede conseguir que el grafeno deje de conducir y se convierta en un aislante (Cao, y otros, 2018). Esto ocurre porque al rotar una lámina de grafeno sobre otra, se da lugar a una estructura con un nuevo patrón *(patrón de Moiré)* que hace que se comporte como si fuera otro material (Figura 2). Este descubrimiento, hecho por un español, no sólo abre la posibilidad de aplicar el grafeno como material superconductor o aislante, sino que también es posible que nos permita desvelar los secretos de la superconductividad.

APLICACIONES DEL GRAFENO

Ahora que son conocidas las principales propiedades del grafeno, no es difícil imaginar por qué se han buscado sus aplicaciones tan rápido y en tantos campos diferentes. A continuación, se describen las principales aplicaciones de este material:

• » **Materiales compuestos.** Esta es la aplicación que más se ve hoy en día a nuestro alrededor, ya que es muy fácil combinar grafeno con plásticos o metales y se requieren pequeñas cantidades para mejorar de manera apreciable sus propiedades. Recordemos que el grafeno es un material muy duro, resistente y ligero, lo que le hace adecuado para recubrir y reforzar otros materiales, haciéndolos menos quebradizos y más resistentes, ligeros y duraderos. Por ejemplo, la industria aeronáutica está trabajando en la línea de emplear grafeno en una matriz de epoxy para reemplazar ciertas aleaciones metálicas en las estructuras de los aviones, convirtiéndolas en más ligeras, pero igualmente resistentes (Rafiee, Rafiee, Yu, & Koratkar, 2009). De esta manera, se puede reducir el combustible necesario para el vuelo o aumentar la distancia que puede recorrer la aeronave. Además, la elevada conductividad eléctrica de este material hace que un avión fabricado con composites de grafeno permita proteger los dispositivos electrónicos del avión ante la eventual descarga de un rayo o protegerlo frente a incendios (Raimondo, y otros, 2018). Todo lo comentado para la industria aeroespacial se puede aplicar igualmente a la industria automotriz. Por poner otro ejemplo, el primer superdeportivo en utilizar composites de grafeno en su chasis es el GTA Spano, de fabricación española. El papel de grafeno, otro material compuesto, ya se está comercializando y, aunque tal vez

Figura 2 » Dos láminas de grafeno rotadas una sobre otra un ángulo de 4° para aumentar el efecto de los patrones de Moiré que se forman. **Fuente: elaboración propia.**



la mayoría de nosotros aún no lo hemos usado, podemos intuir sus características: un material muy fuerte, eléctricamente conductor e incluso biocompatible (Chen, Müller, Gilmore, G.G.Wallace, & Li, 2008). Además del papel de grafeno, también existe la tinta de grafeno, con la que podemos, literalmente, dibujar las conexiones de un circuito eléctrico (Tran, Dutta, & Choudhury, 2018). No nos olvidemos en este apartado de que es químicamente inerte, por lo que, además de aportar resistencia, dureza y conductividad eléctrica a un material, también lo puede hacer resistente ante la corrosión (Aneja, Böhm, Khana, & Böhm, 2017).

• » **Baterías y supercondensadores.** Esta aplicación es una de las que tiene mayor perspectiva de crecimiento por el auge de los automóviles eléctricos. Una batería puede almacenar mucha carga, pero para eso necesitan un largo tiempo de recarga, ya que hay que invertir el proceso químico que se llevó a cabo en la descarga. Sin embargo, un *condensador* está compuesto por dos superficies conductoras muy próximas entre sí y lo único que necesita es un voltaje para que las cargas se distribuyan en ellas rápidamente y quede cargado. Cuanto mayor es la superficie del condensador, mayor es su *capacidad* y más carga puede almacenar por cada voltio aplicado. En nuestro caso, el grafeno se comporta como un excelente conductor y a su vez tiene una gran superficie específica, lo que le hace particularmente idóneo para este tipo de aplicaciones. Además, como es extremadamente ligero y su espesor es monoatómico, permite crear dispositivos ligeros que ocupen un mínimo espacio, lo que sumado a todo lo anterior, ha hecho que la industria automovilística esté centrando su atención en este material y más concretamente en estos dispositivos. El futuro del almacenamiento de energía en la industria automovilística no está en las actuales baterías, sino en supercondensadores que sean ligeros, flexibles, que carguen en un muy corto espacio de tiempo, que sean capaces de almacenar más carga y que la puedan liberar de forma óptima. Esta tecnología es extrapolable a la telefonía móvil o a cualquier aparato que requiera de una fuente de energía, pasando de tiempos de recarga del orden de horas a tiempos del orden de minutos. A pesar de todo esto, no significa que el grafeno vaya a terminar con el mercado de las baterías de ion de litio. En todo caso, contribuirá a su mejora al incorporarlo como ánodo, aumentando así la carga y la durabilidad de estas baterías (Xiang, y otros, 2012). En este apartado podemos mencionar a Samsung (la que actualmente es la empresa con más patentes relacionadas con el grafeno), ya que ha desarrollado una tecnología propia para las baterías de sus móviles y ha anunciado que la va a incorporar en sus próximos modelos (Son, y otros, 2017).

• » **Optoelectrónica.** El ITO (óxido de indio-estaño), se utiliza como recubrimiento transparente conductor (por ejemplo, en pantallas LCD u OLED). Sin embargo, el ITO es un material poco flexible y además requiere de técnicas de crecimiento de láminas delgadas con equipos de vacío, lo que convierte su síntesis en un proceso lento y costoso. Sin embargo, el grafeno tiene una elevadísima conductividad eléctrica, es muy flexible y es prácticamente transparente, por lo que muchas empresas del sector de la optoelectrónica ya están investigando su aplicación e incluso algunas incorporándolo a su producción (pantallas de televisión, pantallas táctiles que a su vez sean plegables, etc.) (Bonaccorso, Sun, Hasan, & Ferrari, 2010). Además, la elevada conductividad térmica del grafeno y la velocidad a la que pueden moverse los electrones por él, le hacen un material idóneo para fabricar procesadores mucho más rápidos y eficientes que los actuales, que podrían trabajar a frecuencias teóricas de 500-1000 GHz. También dentro de esta categoría podemos incluir las células solares basadas en grafeno, que pueden llegar a ser más eficientes que las actuales (Mahmoudi, Wang, & Hahn, 2018).

• » **Ultrafiltración.** Recientemente se ha observado que el *óxido de grafeno* permite el paso de moléculas de agua a través de él, pero no sucede lo mismo con otras sustancias y compuestos. Esta propiedad está siendo muy investigada actualmente porque abre la posibilidad de emplear el óxido de grafeno para potabilizar agua, y su aplicación en el mercado puede ser muy rápida y beneficiosa (Chris Buelke, 2018).

• » **Biología y biomedicina.** El grafeno es, según los experimentos realizados hasta la fecha, biocompatible y, por tanto, no es tóxico para las células sanas. Sin embargo, sí se ha observado que es tóxico para las células cancerosas y que afecta a las bacterias inhibiendo su proliferación en su presencia (Liao, Li, & Tjong, 2018). Sin ir más lejos, un equipo de investigación de la Universidad Europea trabaja en este último punto, empleando óxido de grafeno funcionalizado con polietilenglicol contra la bacteria *C. Albicans* (Cheong, y otros, 2020). Otras aplicaciones en este campo son, por ejemplo, la liberación controlada de fármacos (haciendo uso de la elevada superficie específica) (Liu, Cui, & Losic, 2013) y su empleo en la reparación de nervios dañados (en este caso por su excelente conductividad y biocompatibilidad) (Aydin, Gurcan, Taheri, & Yilmazer, 2018).

• » **Ciencia básica.** Aunque ésta no es una aplicación industrial como tal, sí lo es en lo relativo a su estudio teórico. Dado que los electrones pueden llegar a moverse a velocidades relativistas en este material, no hace falta emplear grandes aceleradores de partículas para el estudio de ciertos aspectos de la electrodinámica. Además, tal y como hemos mencionado antes, es un medio ideal para el estudio del origen de la superconductividad.

¿POR QUÉ NO SE VEN TANTAS APLICACIONES COMO SE ESPERABA?

En primer lugar, hay que mencionar que no ha transcurrido ni una veintena de años desde que se aisló la primera lámina de grafeno y que, en este cortísimo espacio de tiempo, se han estudiado sus propiedades fisicoquímicas y se ha encontrado un gran número de aplicaciones prácticas. De hecho, tal y como hemos mencionado anteriormente, ya hay productos comercializados basados en grafeno y otros que aparecerán en los próximos años. La asombrosa rapidez con la que este material ha sido investigado y aplicado es algo que en la historia sólo se puede comparar con el caso de los *plásticos* (Tiwari, Sahoo, Wang, & Huczko, 2020).

En segundo lugar, la producción de láminas de grafeno de gran tamaño y alta calidad es muy compleja. La técnica de exfoliación que emplearon sus descubridores para aislarlo y que se emplea comúnmente en los laboratorios de investigación, produce unas muestras de muy alta calidad, pero son muy pequeñas y requiere mucho tiempo obtenerlas. Por esa razón, se buscaron alternativas como el crecimiento químico en fase vapor o la oxidación del grafito, aunque ésta última reduce la calidad de las láminas obtenidas. Actualmente, el sistema más prometedor es el *roll-to-roll*, que promete obtener láminas de grafeno de longitud indefinida (Polsen, McNerny, Viswanath, Pattinson, & Hart, 2015).

En tercer lugar, hay aplicaciones que resultan más sencillas de llevar a cabo que otras. Por ejemplo, ya hemos comentado que el grafeno se está empleando en el campo de los materiales compuestos y muy pronto en el de las baterías y los supercondensadores. En sus aplicaciones optoelectrónicas, veremos en breve pantallas flexibles, pero aún tardaremos bastante tiempo en poder comprar dispositivos que trabajen a muy alta frecuencia. De hecho, el principal problema del grafeno para incorporarse a la industria de los semiconductores es que es tan buen conductor que es muy difícil hacer que deje de conducir la electricidad (y es una propiedad básica, ya que se necesitan unos y ceros en las señales digitales). Por eso, convertir el grafeno en semiconductor es otro campo de estudio muy activo (Lu, Yu, Wena, & Chen, 2013). Además, no debemos olvidarnos de que la actual industria de los semiconductores está dominada por la tecnología del silicio, que es muy sofisticada, está muy bien establecida y está extremadamente optimizada. Por eso, un cambio sólo se puede llevar a cabo si la tecnología por la que se va a apostar está muy bien desarrollada.

CONCLUSIÓN

Así como el plástico fue el material del siglo XX, el grafeno será, sin lugar a duda, el material del siglo XXI. En menos de veinte años de estudio se han observado unas propiedades impresionantes que no tienen precedentes en ningún otro material. Sus aplicaciones han surgido casi desde el momento en el que se descubrió y, poco a poco, estamos viendo cómo están llegando al mercado. El grafeno formará parte de los materiales compuestos del futuro, de las baterías y los supercondensadores que llevaremos en nuestros móviles o en nuestros coches, de las pantallas flexibles, de futuras terapias en medicina o de los filtros que purifiquen el agua por poner algunos ejemplos. Sin embargo, es necesario dar unos pasos intermedios para conseguir láminas de grafeno de gran tamaño y alta calidad para llegar a ver algunas de estas aplicaciones convertirse en una realidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aneja, K., Böhm, H., Khana, A., & Böhm, S. (2017). ***Functionalised graphene as a barrier against corrosion.*** Flatchem, 1, 11-19.

Aydin, T., Gurcan, C., Taheri, H., & Yilmazer, A. (2018). ***Graphene Based Materials in Neural Tissue Regeneration. Advances in experimental medicine and biology.*** 1107, 129-142.

Bonaccorso, F., Sun, Z., Hasan, T., & Ferrari, A. (2010). ***Graphene photonics and optoelectronics.*** Nature Photonics, 4, 611–622.

Cao, Y., Fatemi, V., Fang, S., Watanabe, K., Taniguchi, T., Kaxiras, E., & Jarillo-Herrero, P. (2018). ***Unconventional superconductivity in magic-angle graphene superlattices.*** Nature, 556, 43–50.

Chen, H., Müller, M., Gilmore, K., G.G.Wallace, & Li, D. (2008). ***Mechanically Strong, Electrically Conductive, and Biocompatible Graphene Paper.*** Adv. Mater., 20, 3557–3561.

Cheong, Y., Arce, M., Benito, A., Chen, D., Luengo, N., Kerai, L., Ren, G. (2020). ***Synergistic antifungal study of PEGylated graphene oxides and copper nanoparticles against candida albicans.*** Nanomaterials, 10(5), 819.

Chris Buelke, A. A.-S. (2018). ***Graphene oxide membranes for enhancing water purification in terrestrial and space-born applications: State of the art.*** Desalination, 448, 113-132.

Lee, C., Wei, X., Kysar, J., & al., e. (2008). ***Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene.*** Science, 321(5887), 385–388.

Liao, C., Li, Y., & Tjong, S. (2018). ***Graphene Nanomaterials: Synthesis, Biocompatibility, and Cytotoxicity.*** International Journal of Molecular Sciences, 19(11), 3564.

Liu, J., Cui, L., & Losic, D. (2013). ***Graphene and graphene oxide as new nanocarriers for drug delivery applications.*** Acta Biomaterialia, 9(12), 9243-9257.

Lu, G., Yu, K., Wena, Z., & Chen, J. (2013). ***Semiconducting graphene: Converting graphene from semimetal to semiconductor.*** Nanoscale, 5, 1353-1368.

Mahmoudi, T., Wang, Y., & Hahn, Y. (2018). ***Graphene and its derivatives for solar cells application.*** Nano Energy, 47, 51-65.

Nair, R., Blake, P., Grigorenko, A., & et al. (2008). ***Fine structure constant defines visual transparency of graphene.*** Science, 320(5881), 1308.

Polsen, E., McNerny, D., Viswanath, B., Pattinson, S., & Hart, A. (2015). ***High-speed roll-to-roll manufacturing of graphene using a concentric tube CVD reactor.*** Scientific Reports, 5, 10257.

Rafiee, M. A., Rafiee, J., Yu, Z., & Koratkar, N. (2009). ***Buckling resistant graphene nanocomposites.*** Appl. Phys. Lett., 95, 223103.

Raimondo, M., Guadagno, L., Speranza, V., Bonnaud, L., Dubois, P., & Lafdi, K. (2018). ***Multifunctional graphene/POSS epoxy resin tailored for aircraft lightning.*** Composites Part B, 140, 44-56.

Royal Academy of Sciences. (2010). ***Scientific Background on the Nobel Prize in Physics 2010*** GRAPHENE.

Sang, M., Shin, J., Kim, K., & Yu, K. (2019). ***Electronic and Thermal Properties of Graphene and Recent Advances in Graphene Based Electronics Applications.*** Nanomaterials, 9(3), 374.

Son, I., Park, J., Park, S., Park, K., Han, S., Shin, J., Choi, J. (2017). ***Nature Communications. Graphene balls for lithium rechargeable batteries with fast charging and high volumetric energy densities.*** 8, 1561.

Tadyszak, K., Wychowaniec, J., & Litowczenko, J. (2018). ***Biomedical Applications of Graphene-Based Structures.*** Nanomaterials, 8(11), 644.

Tiwari, S., Sahoo, S., Wang, N., & Huczko, A. (2020). ***Graphene research and their outputs: Status and prospect.*** Journal of Science: Advanced Materials and Devices, 5(1), 10-29.

Tran, T., Dutta, N., & Choudhury, N. (2018). ***Graphene inks for printed flexible electronics: Graphene dispersions, ink formulations, printing techniques and applications.*** Advances in Colloid and Interface Science, 261, 41-61.

Wu, Y., Jenkins, K., Valdes-Garcia, A., Farmes, D., Zu, Y., Bol, A., Lin, Y. (2012). ***State of the Art Graphene High Frequency Electronics.*** Nano Letters, 6, 3062-3067.

Xiang, H., Li, Z., Xie, K., Jiang, J., Chen, J., Lian, P., Wang, H. (2012). ***Graphene sheets as anode materials for Li-ion batteries: preparation, structure, electrochemical properties and mechanism for lithium storage.*** RSC Advances, 2, 6792–6799.

BIOGRAFÍA

Darío Gallach Pérez es Doctor en Física con mención internacional por la Universidad Autónoma de Madrid y está especializado en la síntesis y caracterización de nanomateriales para aplicaciones biomédicas y optoelectrónicas. Ha realizado estancias internacionales en el Dipartimento di Scienza dei Materiali de la Università di Milano-Bicocca (Milán, Italia), en el European Synchrotron Radiation Facility (Grenoble, Francia) y en el Joint Research Centre (Ispra, Italia). Es autor de 25 trabajos científicos publicados en revistas internacionales y ha presentado su trabajo en congresos nacionales e internacionales donde ha ganado diferentes premios. Actualmente es profesor del Departamento de Ciencia, Computación y Tecnología de la Universidad Europea y pertenece al grupo de investigación en nanotecnología Nano-UEM.