

Grafeno: producción, caracterización y aplicaciones

Graphene: production, characterization and applications

José Luis García-Bello¹ <https://orcid.org/0000-0002-8238-8402>

Taira Teresa Batista-Luna¹ <https://orcid.org/0000-0001-9770-8061>

Narciso Antonio Villar-Goris¹ <https://orcid.org/0000-0003-0161-3565>

Héctor Manuel Camué-Ciria^{2*} <https://orcid.org/0000-0002-1551-7841>

Denia Cid-Pérez³ <https://orcid.org/0000-0002-2450-2393>

¹Universidad Autónoma de Santo Domingo (UASD). República Dominicana

²Centro Nacional de Electromagnetismo Aplicado. Universidad de Oriente. Cuba

³Pontificia Universidad Católica Madre y Maestra (PCMM). República Dominicana

*Autor para la correspondencia: correo electrónico: camuec@uo.edu.cu

RESUMEN

Entre los compuestos basados en carbono, se encuentra el grafeno. Este es un material excepcional, tanto desde el punto de vista de la investigación en física fundamental, como desde el punto de vista de sus aplicaciones prácticas. El grafeno ocupa un lugar destacado en la ciencia, y las diferentes investigaciones realizadas están permitiendo abrir nuevas vías al desarrollo de materiales funcionales. En este trabajo, se analiza la estructura de este interesante compuesto. También, se describen las propiedades químicas, eléctricas, mecánicas y térmicas. Por otro lado, analizan los métodos empleados para su

síntesis y las técnicas utilizadas para su caracterización. Por último, se aborda su importancia en la creación de nuevos materiales con propiedades mejoradas; así como sus diversas aplicaciones en diferentes áreas de la ciencia y la tecnología. Estas propiedades, también hacen que el grafeno sea el material ideal para ser aplicado, no solo en el campo de la electrónica; sino también la medicina, farmacéutica, energía, entre otras. Dichas propiedades, se verán ampliamente beneficiadas de este novedoso nanomaterial bidimensional.

Palabras clave: grafeno; nanomaterial; carbono; síntesis; propiedades; aplicaciones.

ABSTRACT

Among the carbon-based compounds is graphene. This is an exceptional material, both from the point of view of fundamental physics research and from the point of view of its practical applications. Graphene occupies a prominent place in science, and the different research carried out is opening up new avenues for the development of functional materials. In this work, the structure of this interesting compound is analyzed. In addition, the chemical, electrical, mechanical and thermal properties are described. On the other hand, the methods used for its synthesis and the techniques used for its characterization are analyzed. Finally, its importance in the creation of new materials with improved properties is discussed, as well as its various applications in different areas of science and technology. These properties also make graphene the ideal material to be applied not only in the field of electronics, but also in medicine, pharmaceuticals, energy, among others. These properties will benefit greatly from this novel bidimensional nanomaterial.

Keywords: graphene; nanomaterial; carbon; synthesis; properties; applications.

Recibido: 15/05/2022

Introducción

El grafeno es un material excepcional. Fue aislado por primera vez en el año 2004, por los físicos Andre K. Geim y Konstantin S. Novoselov. Estos investigadores obtuvieron el Premio Nobel, en el año 2010, por los estudios realizados sobre este material. El hecho de estar formado por una única lámina de átomos de carbono, con unas propiedades únicas, ha generado un gran interés en diferentes campos tales como: Ciencia de los materiales, Ciencias biomédicas, entre otros. Este interés se debe a las características únicas del material, tales como: excelente conductividad eléctrica, amplia superficie, dureza y gran conductividad térmica.⁽¹⁾

En la actualidad, por ser considerado un nanomaterial (tamaño de 50 nm), este material se ha convertido en un factor clave en el área de la nanociencia y nanotecnología, la cual ofrece un potencial para el desarrollo de materiales avanzados en diversas áreas de aplicación. En este sentido, se ha empleado para mejorar las propiedades mecánicas o eléctricas de los polímeros; y de esta manera obtener propiedades que no poseen los materiales convencionales.^(2,3)

Precisamente, el grafeno ha sido empleado como refuerzo para diferentes polímeros, por su alto grado de rigidez y fuerza, entre otras propiedades excepcionales. El mismo constituye un elemento capaz de mejorar las propiedades tribológicas, eléctricas, térmicas, entre otros aspectos. En la actualidad, un número creciente de investigadores estudian los efectos del grafeno.⁽⁴⁾ El objetivo de este trabajo, es profundizar en los aspectos relacionados con la producción, caracterización y aplicaciones del grafeno; así como, hacer énfasis en la versatilidad de este nanomaterial para ser aplicado, no solo en el campo de la electrónica; sino también la medicina, farmacéutica, energía, entre otras.

Desarrollo

El grafeno es el más novedoso de los nanomateriales derivados del carbono. Este material, consiste en una lámina monoatómica plana de átomos de carbono unidos mediante enlaces covalentes sp^2 . Tomando como base discriminadora la especificidad de sus propiedades, el grafeno puede ser clasificado en tres tipos: monocapa, bicapa y aquél que se haya en un rango de 3 a 10 capas. Las estructuras consistentes de más de 10 capas son consideradas hojas de grafeno espesas y son de poco interés científico.^(5,6)

En el año 2004, Geim y Novoselov obtuvieron e identificaron por primera vez láminas individuales de grafeno junto con otros cristales bidimensionales mediante un procedimiento conocido como exfoliación micromecánica. Este método, que se basa en la relativa debilidad de la interacción entre las láminas de grafeno que conforman el grafito, consiste básicamente en la exfoliación repetida de la pieza de grafito empleando cinta adhesiva.⁽⁷⁾

Existen varias hipótesis para tratar de explicar la imprevista estabilidad de estas láminas aisladas. Por un lado, las láminas provienen de una estructura tridimensional previa, lo cual, unido a sus pequeños tamaños laterales y a la fuerza de los enlaces covalentes entre los átomos de carbono, presumiblemente las hace resistentes a las fluctuaciones térmicas. Por otro lado, las ondulaciones microscópicas que presentan las láminas podrían contribuir a su estabilidad y a otras propiedades interesantes del grafeno.^(8,9)

El grafeno puede considerarse como el bloque constructor a partir del cual se forman materiales gráfiticos de todas dimensiones. Las láminas de grafeno se pueden envolver para formar fullerenos que son estructuras esféricas (0D). También, pueden enrollarse y formar los nanotubos cilíndricos (1D). Adicionalmente, éstas láminas pueden apilarse para formar grafito tridimensional (3D).⁽¹⁰⁾

Propiedades químicas

El grafeno presenta anisotropía química: en los planos basales es bastante inerte, mientras que en los bordes de las láminas o en zonas de defectos estructurales es altamente reactivo.⁽¹¹⁾ No obstante, es susceptible de sufrir reacciones de oxidación. Esto posibilita la obtención de un derivado importante del grafeno, el óxido de grafeno.⁽¹²⁾

Considerado incluso como un sistema conjugado extendido, el grafeno es de 100 a 1000 veces más grande que las moléculas orgánicas típicas, por tanto, la funcionalización de estas redes gráficas facilita la síntesis de nuevas moléculas híbridas. La extensión de las laminillas permite que diversas moléculas y átomos puedan ser unidos en ambos lados de las hojas.⁽¹³⁾

El grafeno es una estructura nanométrica, variedad alotrópica bidimensional de átomos de carbono fuertemente cohesionados en una superficie ligeramente plana, con ondulaciones, de un átomo de espesor. Estos átomos forman una red hexagonal tipo panal de abeja con un átomo de carbono en cada vértice. Por su configuración atómica hexagonal, esta laminilla compuesta por anillos de benceno desprovistos de sus átomos de hidrógeno, es considerada para el estudio de las propiedades de los alótropos de carbono (figura 1).⁽¹⁴⁾

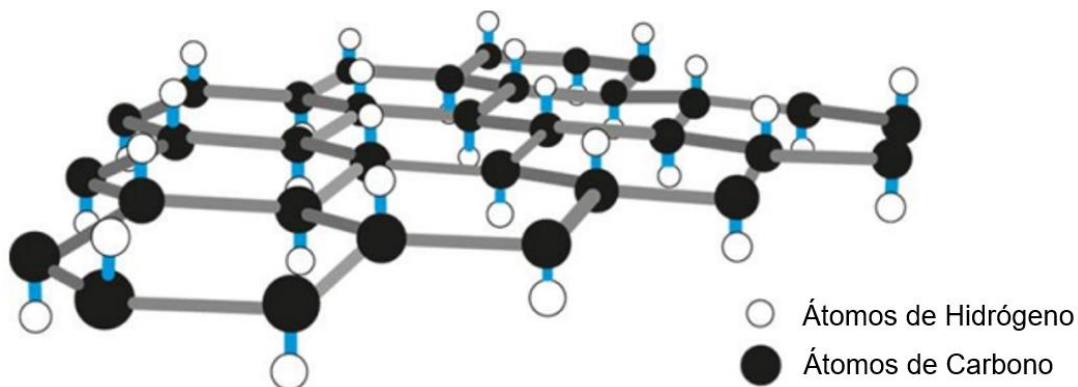


Fig. 1- Estructura del grafeno

Los átomos de carbono, en el grafeno, se encuentran separados una distancia de $1,42\text{\AA}$. El parámetro de red es de $2,46\text{\AA}$ y tiene dos átomos de carbono por celda

unidad. Todos los átomos de la red están unidos entre sí mediante enlaces covalentes. El carbono tiene cuatro electrones de valencia: tres de ellos tienen hibridación sp^2 y se encuentran formando enlaces covalentes tipo σ en el plano con un ángulo de 120° , y uno se encuentra en un orbital perpendicular tipo p . El solapamiento lateral de los orbitales tipo P da lugar a la formación de enlaces tipo π , los cuales forman un inmenso orbital molecular deslocalizado (nube π) entre todos los átomos de carbono que constituyen la capa de grafeno. Este gran orbital π no afecta de manera relevante la rigidez y dureza del grafeno, pero es el responsable de la gran movilidad electrónica que presenta.⁽⁸⁾

El sistema π -conjugado bidimensional del grafeno le otorga unas excelentes propiedades eléctricas, mecánicas y térmicas, interesantes tanto a nivel teórico como experimental. El grafeno es considerado estructuralmente como el material más delgado jamás obtenido: una lámina de grafeno tiene un espesor de $3,35 \text{ \AA}$ (100 000 veces más delgado que el cabello humano más fino).⁽¹⁴⁾

Propiedades eléctricas

Están estrechamente relacionadas con las químicas. Como se dijo anteriormente, en la hibridación cada átomo contribuye con tres electrones para la formación de los enlaces σ (hibridación sp^2), y esos enlaces están en un plano a 120° entre sí, generando una estructura plana. El electrón de valencia restante se encuentra en un orbital atómico p_z perpendicular al plano de los orbitales sp^2 . El solapamiento de los orbitales p_z no hibridados da lugar a orbitales π que se extienden verticalmente por encima y por debajo del plano, y en los que los electrones están deslocalizados sobre la lámina del grafeno. Estos electrones hacen del grafeno un excelente conductor, mejor incluso que el cobre, siendo la conductividad del grafeno $0,96 \cdot 10^8 \text{ Sm}^{-1}$, mientras que la del cobre es $0,60 \cdot 10^8 \text{ Sm}^{-1}$.⁽¹⁵⁾

Propiedades mecánicas

Este material es increíblemente ligero: tiene una densidad de únicamente $0,77 \text{ mg/m}^2$, y por tanto, una gran área superficial específica (máximo teórico de 2600

m²/g). Sus excepcionales propiedades mecánicas, lo convierten en el material más resistente conocido, con una resistencia a la tracción de 130 GPa y un elevado módulo de Young (1,0 TPa). Este elevado módulo de Young indica que el grafeno es un material sumamente elástico que puede soportar grandes presiones modificando su elongación sin sufrir ruptura. Así, a pesar de ser un material sumamente ligero, el grafeno introduce una alta resistencia mecánica en compuestos, cuando se emplea como aditivo en polímeros.^(16,17,18)

Propiedades térmicas

La conductividad térmica, a temperatura ambiente, del grafeno es mayor que la de cualquier material conocido (aproximadamente 5000 Wm⁻¹K⁻¹), siendo 10 veces mejor conductor térmico que el cobre. Esta característica, lo convierte en un candidato ideal para la fabricación de disipadores térmicos y de materiales compuestos de gran conductividad térmica. Sin embargo, el flujo de calor en la dirección del plano transversal del grafeno está fuertemente limitado por los enlaces de Van der Waals entre planos. Las propiedades térmicas del grafeno le confieren una gran habilidad para disipar calor, lo que constituye un factor a tener en cuenta con vistas a su uso en dispositivos electrónicos.^(20,21)

Métodos de síntesis del grafeno

Los métodos para la síntesis del grafeno se clasifican en dos estrategias distintas: exfoliación de grafito para obtener grafeno (métodos top down, o descendentes) y construcción de grafeno a partir de bloques de construcción moleculares (métodos bottom up, o ascendentes).⁽²²⁾

Método ascendente (Bottom-up)

Deposición de Vapores Químicos (CVD)

Este método consiste en realizar un depósito químico en fase de vapor de algún hidrocarburo (por ejemplo, metano) sobre algún metal de transición (rutenio, níquel

etc.). Cuando el sustrato de metal es expuesto al vapor de hidrocarburo se produce una nucleación y el crecimiento de una lámina de grafeno al descomponerse el hidrocarburo en la superficie metálica. La ventaja de este método es que obtienen láminas de grafeno de buena calidad en su estructura y además permite dopar fácilmente el grafeno al introducir distintos gases durante el crecimiento. La desventaja del método es su elevado costo y el hecho de involucrar altas temperaturas y bajas presiones exige un conjunto de instrumentos complejos. Otra gran desventaja del método es que al obtenerse grafeno en un sustrato metálico lo hace inviable para su uso en la electrónica sin antes remover el sustrato, algo que complejiza aún más el método.^(23,24,25,26)

Crecimiento epitaxial

El método produce un crecimiento epitaxial en un aislante, generalmente carburo de silicio; consiste en realizar una sublimación térmica del silicio a temperaturas que pueden llegar a superar 1300°C, a la vez que el carbono se reordena para formar una capa de grafeno. Se producen así láminas de una gran calidad estructural, aunque de nuevo a un elevado costo ya que se trabaja en Vacío Ultra Alto.^(27,28)

Síntesis y reducción de óxido de grafeno

El método consiste en, primero oxidar el grafito para separar las capas mediante grupos funcionales en los dominios aromáticos (hidroxilos, epóxidos, etc.) que se introducen entre las capas de forma que aumenta la distancia interlaminar y disminuir la interacción de Van der Waals. Luego de este proceso lo que se obtiene es óxido de grafeno que dista mucho de tener las propiedades del grafeno. Es por esto que debe reducirse el óxido de grafeno usando agentes reductores que eliminan los grupos funcionales agregado en el proceso de oxidación.^(29,30)

Método descendente (Top-down)

Exfoliación Química

Este método consiste en el uso de otros compuestos químicos para que éstos se intercalen en las láminas de grafito a la vez que se somete la mezcla a ultrasonido, facilitando así la separación de las mismas produciendo capas de grafeno. Este método permite obtener láminas de grafeno de gran calidad, que son de pequeños tamaños y en pequeñas cantidades.⁽³¹⁾

Exfoliación micromecánica

La exfoliación micromecánica es básicamente un proceso de clivaje repetido. Una hojuela de 1 mm de espesor de grafito pirolítico comercial altamente orientado es sometida a grabado en seco en plasma de oxígeno para hacer muchas mesas de 5 μm de profundidad (con área de 0,4 a 4 mm^2). Luego, la hojuela se deposita en un fotoresistor y es calentada. Posteriormente, se usa repetidamente una cinta scotch-tape para despegar las capas de la hojuela de grafito. Finalmente, las delgadas hojas adheridas a la superficie del fotoresistor se liberan en acetona y se transfieren a un substrato de silicio para su análisis.⁽³²⁾

Exfoliación en solución

Como alternativa a la exfoliación micromecánica para la obtención de grafeno, se desarrolló la exfoliación de grafito en medio líquido, que permite la producción a gran escala de este material. El método consiste en dispersar grafito en un solvente orgánico con energía de superficie similar a la del grafito, de modo tal que la energía de barrera se reduce facilitando la separación de las capas de grafeno del cristal. La solución es sonicada en un baño ultrasónico, y se realizan centrifugaciones para obtener las láminas de grafeno.^(33, 34)

Técnicas para la caracterización del grafeno

Los métodos empleados para la caracterización de nanocompuestos juegan un papel importante en la confirmación de los resultados deseados, en cuanto a

forma, tamaño, estructura, distribución y composición. Estas técnicas brindan grandes posibilidades para el análisis de la superficie del refuerzo, la evaluación del estado de dispersión del refuerzo en la matriz polimérica, la magnitud de la interacción entre el polímero y las partículas del refuerzo.⁽³⁵⁾ Entre estas técnicas se destacan:

Difracción de rayos x

La difracción de rayos X permite determinar la distancia interlaminar y el grado de cristalinidad de las dos fases utilizadas. Esta técnica se basa en el fenómeno de interferencias constructivas, que consiste en la incidencia de un haz de rayos X sobre un material sólido. Para que ocurra este proceso, se debe cumplir con la ley de Bragg; y los átomos del material sólido deben tener una disposición ordenada dentro de su estructura. La ley de Bragg, relaciona la longitud de onda de los rayos X con la distancia interatómica y el ángulo de incidencia del haz sobre la muestra.⁽³⁶⁾

Microscopía electrónica de transmisión

El principio de funcionamiento se basa en irradiar una muestra ultrafina (entre 5 nm a 0,5 μm), con un haz de electrones. Este haz posee una energía en el rango de 60 a 200 keV (usualmente 100 keV), que permite atravesar la muestra. Los electrones transmitidos atraviesan la muestra sin desviarse y forman la imagen al ser detectados en una pantalla fluorescente. Se pueden observar los objetos con dimensiones de 0,2 a 0,5 nm. En la actualidad, esta técnica se considera indispensable para conocer la relación entre la morfología y la estructura a nivel atómico o molecular en metales, cerámicos y polímeros.⁽³⁷⁾

Microscopía de fuerza atómica

La microscopía de fuerza atómica es una técnica avanzada de análisis que permite determinar propiedades y estructuras de una variedad de materiales con

una extraordinaria resolución espacial, por ello ha sido crucial en el desarrollo de la nanotecnología, en especial en la interpretación y apreciación de las dimensiones nanométricas. Esta técnica permite obtener imágenes de superficie de alta resolución, a la vez que aporta con información topográfica, química y mecánica de una multiplicidad de materiales.⁽³⁸⁾ Adicionalmente, también es útil en estudios de indentación de materiales blandos (polímeros) y permite caracterizar propiedades elásticas de la muestra.⁽³⁹⁾

Espectroscopía Raman

La espectroscopía Raman es una técnica no destructiva empleada para caracterizar compuestos basados en materiales de carbono. El efecto Raman es una dispersión inelástica de la luz, que ocurre por la irradiación de una molécula con una luz del monocromática. Permite distinguir estructuras de carbono ordenadas y desordenadas. Esta técnica ha sido ampliamente aplicada para la caracterización del estado vibracional de varios materiales basados en carbono; tales como: diamante, grafito, grafeno, fullereno y nanotubos de carbono.⁽⁴⁰⁾

Resonancia Magnética Nuclear

El método de Resonancia magnética nuclear (RMN), es una técnica no destructiva que permite el estudio de la microestructura de macromoléculas. Se emplea para la caracterización de estructuras presentes en los polímeros. Mediante esta técnica, se pueden analizar los núcleos de ^1H , ^{13}C , ^{19}F , ^{31}P y ^{33}S . La misma permite estudiar detalladamente la química y dinámica moleculares en polímeros. Estas características moleculares se reflejan en el espectro del desplazamiento químico y en los tiempos de relajación.^(41,42) Así, siempre que sea posible la correlación del parámetro de RMN con la propiedad o propiedades del material polimérico, la imagen de RMN representará la distribución espacial de esa propiedad en la muestra.⁽⁴³⁾

Grafeno: creación de nuevos materiales y aplicaciones

Los nuevos materiales, obtenidos de la inclusión de nanopartículas de grafeno en matrices poliméricas, pueden mejorar sus propiedades tribológicas, mecánicas; así como las conductividades térmica y eléctrica. Teniendo en cuenta esto, los nuevos materiales creados pueden emplearse en diversos campos tecnológicos.⁽⁴⁴⁾

Los nanocompuestos de grafeno, en forma de películas conductoras, recubrimientos, adhesivos estructurales, etc., pueden ser una parte integral de las estrategias de protección anti-relámpago en aviación, torres de telecomunicación y paletas de turbinas eólicas.⁽⁴⁵⁾

Las películas de estos materiales son buenas conductoras, transparentes y tienen aplicaciones como parabrisas para reflejo solar, ventanas autolimpiables, recubrimientos para disipar cargas electrostáticas, dispositivos con características de sensor y recubrimiento anticorrosivo.^(46,47) Debido a su elevada movilidad electrónica, a temperatura ambiente y a la baja densidad de defectos en su estructura, se pueden integrar a sensores de gases y biosensores.^(48,49) Al ser las películas ultrafinas, ópticamente transparentes y conductoras, son una alternativa a los electrodos de óxidos metálicos semiconductores utilizados en celdas solares.⁽⁵⁰⁾ También, pueden ser un componente para electrodos en las baterías de litio.⁽⁵¹⁾

La gran área superficial y la conductividad electrónica son propiedades importantes en materiales utilizados en almacenamiento electroquímico, a través de procesos faradaicos; y en almacenamiento eléctrico, mediante procesos no-faradaicos. Ambos procesos, son los que se llevan a cabo en las baterías y en los supercondensadores, respectivamente. La combinación de ambos procesos se da en dispositivos híbridos. Además, su gran área superficial puede ser aprovechada como soporte catalítico en celdas de combustible.^(52, 53)

El almacenamiento de energía en supercondensadores se realiza a través de la formación de una doble capa electroquímica. En cada electrodo se produce una polarización por el paso de electrones, luego las cargas contrarias de los iones en

la disolución electrolítica son atraídas electrostáticamente hacia los electrodos cargados. ⁽⁵⁴⁾ Por lo tanto, la extensión de esa doble capa y, en consecuencia, la cantidad de energía almacenada (capacitancia) dependerá del área superficial de los materiales utilizados como electrodos. Ya que las cargas y las descargas en supercondensadores se hacen a gran velocidad, la alta conductividad electrónica jugará también un papel importante. ^(54, 55)

Un caso llamativo, es la formación del nanocompuesto polimérico Politetrafluoretileno/grafeno. Este posee una elevada propiedad autolubrificante que ha sido bien explotada para mejorar la fricción y reducir el desgaste en engranajes, rodamientos y articulaciones humanas cadera-rodilla, etc. ⁽⁵⁶⁾ Por otro lado, también se utiliza en la separación de combustibles contaminantes del agua y en el tratamiento de aguas residuales. ⁽⁵⁷⁾

Las aplicaciones del grafeno son muy diversas y se extienden a la ingeniería y regeneración de tejidos ⁽⁵⁸⁾, la terapia del cáncer ⁽⁵⁹⁾, la producción de materiales antivirales y antibacterianos ⁽⁶⁰⁾, la obtención de imágenes médicas ⁽⁶¹⁾, los biodetectores o biosensores ⁽⁶²⁾; así como equipos y dispositivos médicos. ⁽⁶²⁾

Conclusiones

El grafeno y los nanocompuestos poliméricos en los que se incluye, tienen una gran variedad de aplicaciones en diversas ramas de la ciencia y la tecnología. Mediante la creación de este tipo compuesto, aprovechando las propiedades del grafeno, es posible controlar las propiedades fundamentales de los materiales, tales como la temperatura de fusión, propiedades magnéticas, capacidad de carga, e incluso el color, sin cambiar la composición química de los materiales. Estas propiedades facilitan la obtención de nuevos productos de alto rendimiento; así como tecnologías con nuevas y mejores potencialidades.

Agradecimientos

Los autores agradecen la inapreciable ayuda brindada por el Ministerio de Educación Superior, Ciencia y Tecnología (MESCYT), República Dominicana; y al proyecto 2020-2021-2A2-102.

Referencias bibliográficas

1. MADURANI, K.A.; *et al.* Progress in graphene synthesis and its application: History, challenge and the future outlook for research and industry. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 2020,**9**(9), pp. 093013. ISSN: 2162-8777. DOI: <https://doi.org/10.1149/2162-8777/abbb6f>
2. WINNE, J.M.; LEIBLER, L.; and DU PREZ, F.E. Dynamic covalent chemistry in polymer networks: a mechanistic perspective. *Polymer Chemistry*, 2019,**10**(45), pp. 6091-6108. ISSN: 1759-9962. DOI: <https://doi.org/10.1039/C9PY01260E>
3. DUNLOP, M.J.; and BISSESSUR, R. Nanocomposites based on graphene analogous materials and conducting polymers: a review. *Journal of Materials Science*, 2020, **55**(16), pp. 6721-6753. ISSN: 0022-2461. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-020-04479-9>
4. ROSENKRANZ, A.; LIU, Y.; YANG, L.; and CHEN, L. 2D nano-materials beyond graphene: from synthesis to tribological studies. *Applied Nanoscience*, 2020, **10**(9), pp. 3353-3388. ISSN: 2190-5517. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13204-020-01466-z>
5. SUMDANI, M.G.; ISLAM, M.R.; YAHAYA, A.N.A.; and SAFIE, S.I. Recent advances of the graphite exfoliation processes and structural modification of graphene: a review. *Journal of Nanoparticle Research*, 2021, **23**(11), pp.1-35. ISSN: 1572-896X. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11051-021-05371-6>

6. TIWARI, S.K.; SAHOO, S.; WANG, N.; and HUCZKO, A. Graphene research and their outputs: Status and prospect. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, 2020, **5**(1), pp. 10-29. ISSN: 2468-2179. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsamd.2020.01.006>
7. SUN, Z.; and HU, Y.H. Ultrafast, low-cost, and mass production of high-quality graphene. *Angewandte Chemie International Edition*, 2020, **59**(24), pp. 9232-9234. ISSN: 1521-3773. DOI: <https://doi.org/10.1002/anie.20202256>
8. YANG, G.; LI, L.; LEE, W.B.; and NG, M.C. Structure of graphene and its disorders: a review. *Science and technology of advanced materials*, 2018, **19**(1), pp. 613-648. ISSN: 1878-5514. DOI: <https://doi.org/10.1080/14686996.2018.1494493>
9. KAZEMZADEH, A.; *et al.* Preparation of graphene nanolayers through surfactant-assisted pure shear milling method. *Journal of Composites and Compounds*, 2019, **1**(1), pp. 22-26. ISSN: 2716-9650. DOI: <https://doi.org/10.29252/jcc.1.1.4>
10. COROŞ, M.; *et al.* A brief overview on synthesis and applications of graphene and graphene-based nanomaterials. *Frontiers of Materials Science*, 2019, **13**(1), pp. 23-32. ISSN: 2095-0268. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11706-019-0452-5>
11. CATALDI, P.; ATHANASSIOU, A.; and BAYER, I.S. Graphene Nanoplatelets-Based Advanced Materials and Recent Progress in Sustainable Applications. *Appl Sci*, 2018, **8**(9), pp. 1438. ISSN: 2076-3417. DOI: <https://doi.org/10.3390/app8091438>
12. SOLÍS-FERNÁNDEZ, P.; and AGO B.M.H. Synthesis, structure and applications of graphene-based 2D heterostructures. *Chem Soc Rev*, 2017, **46**, pp. 4572–4613. ISSN: 1460-4744. DOI: <https://doi.org/10.1039/C7SC00160F>
13. ZHAO, Z.; *et al.* An overview of graphene and its derivatives reinforced metal matrix composites: Preparation, properties and applications. *Carbon*, 2020, **170**, pp. 302-326. ISSN: 0008-6223. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2020.08.040>

14. QIAO, Q.; LIU, C.; GAO, W.; and HUANG, L. Graphene oxide model with desirable structural and chemical properties. *Carbon*, 2019, **143**, pp. 566-577. ISSN: 0008-6223. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2018.11.063>
15. HOUTSMA, R.K.; RIE, J.; and STÖHR, M. Atomically precise graphene nanoribbons: interplay of structural and electronic properties. *Chemical Society Reviews*, 2021, **50**(11), pp. 6541-6568. ISSN: 1460-4744. DOI: <https://doi.org/10.1039/D0CS01541E>
16. ZHENG, S.; CAO, Q.; LIU, S.; and PENG, Q. Atomic structure and mechanical properties of twisted bilayer graphene. *Journal of Composites Science*, 2018, **3**(1), pp. 2. ISSN: 0266-3538. DOI: <https://doi.org/10.3390/jcs3010002>
17. Young, R.J.; *et al.* The mechanics of reinforcement of polymers by graphene nanoplatelets. *Composites Science and Technology*, 2018, **154**, pp. 110-116. ISSN: 0266-3538. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2017.11.007>
- 18 WANG, J.; *et al.* Graphene and graphene derivatives toughening polymers: Toward high toughness and strength. *Chemical Engineering Journal*, 2019, **370**, pp. 831-854. ISSN: 1385-8947. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.03.229>
19. REN, S.; RONG, P.; and YU, Q. Preparations, properties and applications of graphene in functional devices: A concise review. *Ceramics International*, 2018, **44**(11), pp. 11940-11955. ISSN: 0272-8842. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.04.089>
- 20 HUANG, P.; *et al.* Graphene film for thermal management: A review. *Nano Materials Science*, 2021, **3**(1), pp.1-16. ISSN: 2589-9651. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nanoms.2020.09.001>
21. SANG, M.; SHIN, J.; KIM, K.; and YU, K.J. Electronic and thermal properties of graphene and recent advances in graphene based electronics applications. *Nanomaterials*, 2019, **9**(3), pp. 374. ISSN: 2079-4991. DOI: <https://doi.org/10.3390/nano9030374>

22. LIN, L.; PENG, H.; and LIU, Z. Synthesis challenges for graphene industry. *Nature materials*, 2019, **18**(6), pp. 520-524. ISSN: 1476-4660. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41563-019-0341-4>
23. WU, Y.; WANG, S.; and KOMVOPOULOS, K. A review of graphene synthesis by indirect and direct deposition methods. *Journal of Materials Research*, 2020, **35**(1), pp. 76-89. ISSN: 2044-5326. DOI: <https://doi.org/10.1557/jmr.2019.377>
24. PASHOVA, K.; *et al.*, Graphene synthesis by microwave plasma chemical vapor deposition: analysis of the emission spectra and modeling. *Plasma Sources Science and Technology*, 2019, **28**(4), pp. 045001. ISSN: 1361-6595. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6595/ab0b33>
25. XIN, H.; and LI, W. A review on high throughput roll-to-roll manufacturing of chemical vapor deposition graphene. *Applied Physics Reviews*, 2018, **5**(3), pp. 031105. ISSN: 1931-9401. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5035295>
26. DE FAZIO, D.; *et al.* High-mobility, wet-transferred graphene grown by chemical vapor deposition. *ACS nano*, 2019, **13**(8), pp. 8926-8935. ISSN: 1936-086X. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsnano.9b02621>
27. SANTANGELO, M.F.; *et al.* Real-time sensing of lead with epitaxial graphene-integrated microfluidic devices. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2019, **288**, pp. 425-431. ISSN: 0925-4005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2019.03.021>
28. ADETAYO, A.; and RUNSEWE, D. Synthesis and fabrication of graphene and graphene oxide: A review. *Open Journal of Composite Materials*, 2019, **9**(2), pp. 207. ISSN: 1530-793X. DOI: <https://doi.org/10.4236/ojcm.2019.92012>
29. TARCAN, R.; *et al.* Reduced graphene oxide today. *Journal of Materials Chemistry C*, 2020, **8**(4), pp. 1198-1224. ISSN: 20507534. DOI: <https://doi.org/10.1039/C9TC04916A>
30. RANJAN, P.; *et al.* A Low-Cost Non-explosive Synthesis of Graphene Oxide for Scalable Applications. *Scientific Reports*, 2018, **8**(1), pp. 12007. ISSN: 2045-2322. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-30613-4>

31. LIU, F.; *et al.* Synthesis of graphene materials by electrochemical exfoliation: Recent progress and future potential. *Carbon Energy*, 2019, **1**(2), pp. 173-199. ISSN: 2637-9368. DOI: <https://doi.org/10.1002/cey2.14>
32. SINCLAIR, R.C.; SUTER, J.L.; and COVENEY, P.V. Micromechanical exfoliation of graphene on the atomistic scale. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2019, **21**(10), pp. 5716-5722. ISSN: 1463-9084. DOI: <https://doi.org/10.1039/C8CP07796G>
33. XU, Y.; *et al.* Liquid-phase exfoliation of graphene: an overview on exfoliation media, techniques, and challenges. *Nanomaterials*, 2018, **8**(11), pp. 942. ISSN: 2079-4991. DOI: <https://doi.org/10.3390/nano8110942>
34. AGUDOSI, E.S.; *et al.* A Review of the Graphene Synthesis Routes and its Applications in Electrochemical Energy Storage. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 2020, **45**(5), pp. 339-377. ISSN: 10408436. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408436.2019.1632793>
35. VINYAS, M.; *et al.* A comprehensive review on analysis of nanocomposites: from manufacturing to properties characterization. *Materials Research Express*, 2019, **6**(9), pp. 092002. ISSN: 2053-1591. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cossms.2018.09.003>
36. SCHÜLLI, T.U.; and LEAKE, S.J. X-ray nanobeam diffraction imaging of materials. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 2018, **22**(5), pp.188-201. ISSN: 1359-0286. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cossms.2018.09.003>
37. FRANKEN, L.E.; GRÜNEWALD, K.; BOEKEMA, E.J.; and STUART, M.C. A Technical Introduction to Transmission Electron Microscopy for Soft-Matter: Imaging, Possibilities, Choices, and Technical Developments. *Small*, 2020, **16**(14), pp.1906198. ISSN: 1613-6829. DOI: <https://doi.org/10.1002/smll.201906198>
38. LI, R.; *et al.* Determination of PMMA Residues on a Chemical-Vapor-Deposited Monolayer of Graphene by Neutron Reflection and Atomic Force

- Microscopy. *Langmuir*, 2018, **34**(5), pp. 1827-1833. ISSN: 1520-5827. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.7b03117>
39. WANG, D.; and RUSSELL, T.P. Advances in Atomic Force Microscopy for Probing Polymer Structure and Properties. *Macromolecules*, 2018, **51**(1), pp. 3-24. ISSN: 1520-5835. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.macromol.7b01459>
40. WU, J.B.; *et al.* Raman spectroscopy of graphene-based materials and its applications in related devices. *Chemical Society reviews*, 2018, **47**(5), pp. 1822-1873. ISSN: 1460-4744. DOI: <https://doi.org/10.1039/C6CS00915H>
41. WEI, Z.; BECWAR, S.M.; CHMELKA, B.F.; and SAUTET, P. Atomic environments in N-containing graphitic carbon probed by first-principles calculations and solid-state nuclear magnetic resonance. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2021, **125**(16), pp. 8779-8787. ISSN: 1932-7455. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.1c00511>
42. MAZUR, A.S.; VOVK, M.A.; and TOLSTOY, P.M. Solid-state ^{13}C NMR of carbon nanostructures (milled graphite, graphene, carbon nanotubes, nanodiamonds, fullerenes) in 2000–2019: a mini-review. *Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures*, 2020, **28**(3), 202-213. ISSN: 1536-4046. DOI: <https://doi.org/10.1080/1536383X.2019.1686622>
43. ZHU, Y.; *et al.* Mass production and industrial applications of graphene materials. *National Science Review*, 2018, **5**(1), pp. 90-101. ISSN: 2053-714X. DOI: <https://doi.org/10.1093/nsr/nwx055>
44. SUSHMITA, M.A.; *et al.* Mechanistic Insight into the Nature of Dopants in Graphene Derivatives Influencing Electromagnetic Interference Shielding Properties in Hybrid Polymer Nanocomposites. *J Phys Chem C*, 2019, **123**, pp. 2579–2590. ISSN: 1932-7455. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.8b10999>
45. MÜLLER, K.; *et al.* Review on the processing and properties of polymer nanocomposites and nanocoatings and their applications in the packaging, automotive and solar energy fields. *Nanomaterials*, 2017, **7**(4), pp. 74. ISSN: 2079-4991. DOI: <https://doi.org/10.3390/nano7040074>

46. ZHANG, D.Y.; *et al.* Incorporation of different proportions of polytetrafluoroethylene and graphene into polyethersulfone matrix as efficient anticorrosive coatings. *J Appl Polym Sci*, 2019, **136**(37), pp. 47942. ISSN: 1097-4628. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.47942>
47. TIAN, W.; LIU, X.; and YU, W. Research progress of gas sensor based on graphene and its derivatives: A review. *Applied Sciences*, 2018, **8**(7), pp.1118. ISSN: 2076-3417. DOI: <https://doi.org/10.3390/app8071118>
48. DEMON, S.Z.N.; *et al.* Graphene-based materials in gas sensor applications: A review. *Sens Mater*, 2020, **32**(2), pp. 759-777. ISSN: 2435-0869. DOI: <https://doi.org/10.18494/SAM.2020.2492>
49. TJONG, S.C. Polymer Composites with Graphene Nanofillers: Electrical Properties and Applications. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2014, **14**(2), pp. 1154-1168. ISSN: 1533-4899. DOI: <https://doi.org/10.1166/jnn.2014.9117>
50. LU, Y.; *et al.* Recent development of graphene-based materials for cathode application in lithium batteries: a review and outlook. *Int J Electrochem Sci*, 2019, **14**, pp. 5961-5971. ISSN: 1452-3981. DOI: <https://doi.org/10.20964/2019.07.50>
51. SMITH, A.T.; *et al.* Synthesis, properties, and applications of graphene oxide/reduced graphene oxide and their nanocomposites. *Nano Materials Science*, 2019, **1**(1), pp. 31-47. ISSN: 2589-9651. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nanoms.2019.02.004>
52. MAO, J.; *et al.* Graphene aerogels for efficient energy storage and conversion. *Energy & Environmental Science*, 2018, **11**(4), pp.772-799. ISSN: 1754-5706. DOI: <https://doi.org/10.1039/C7EE03031B>
53. CHANG, L.; and HU, Y.H. Breakthroughs in designing commercial-level mass-loading graphene electrodes for electrochemical double-layer capacitors. *Matter*, 2019,**1**(3), pp. 596-620. ISSN: 2590-2385. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matt.2019.06.016>

54. ZHAO, X.; *et al.* A review of studies using graphenes in energy conversion, energy storage and heat transfer development. *Energy Conversion and Management*, 2019, **184**, pp. 581-599. ISSN: 0196-8904. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.01.092>
55. TEO, A.J.T.; *et al.* Polymeric Biomaterials for Medical Implants and Devices. *ACS Biomaterials Science & Engineering*, 2016, **2**(4), pp. 454-472. ISSN: 2373-9878. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsbmaterials.5b00429>
56. ATURALIYA R.; *et al.* Expanded Polytetrafluoroethylene/Graphite Composites for Easy Water/Oil Separation,. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2020, **12**, pp. 38241–38248. ISSN: 1944-8252. DOI: <https://doi.org/10.1021/acscami.0c11583>
57. SILVA, M.; ALVES, N.M.; and PAIVA, M.C. Graphene-polymer nanocomposites for biomedical applications. *Polymers for Advanced Technologies*, 2018, **29**(2), pp. 687-700. ISSN: 1099-1581. DOI: <https://doi.org/10.1002/pat.4164>
58. SREEHARSHA, N.; *et al.* Graphene-based hybrid nanoparticle of doxorubicin for cancer chemotherapy. *International Journal of Nanomedicine*, 2019, **14**, pp. 7419-7429. ISSN: 1178-2013. DOI: <https://doi.org/10.2147/IJN.S211224>
59. XIA, M.Y.; *et al.* Graphene-based nanomaterials: the promising active agents for antibiotics-independent antibacterial applications. *Journal of Controlled Release*, 2019, **307**, pp.16-31. ISSN: 1873-4995. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2019.06.011>
60. MA, Y.; *et al.* Robust and Antibacterial Polymer/Mechanically Exfoliated Graphene Nanocomposite Fibers for Biomedical Applications. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, **10**(3), pp. 3002-3010. ISSN: 1944-8252. DOI: <https://doi.org/10.1021/acscami.7b17835>
61. WANG, W.R.; *et al.* Review-Biosensing and Biomedical Applications of Graphene: A Review of Current Progress and Future Prospect. *Journal of the*

Electrochemical Society, 2019, **166**(6), pp. 505-520. ISSN: 1945-7111. DOI: <https://doi.org/10.1149/2.1231906jes>

62. KUMAR, R.; *et al.* Graphene as biomedical sensing element: State of art review and potential engineering applications. *Composites Part B: Engineering*, 2018, **134**, pp.193-206. ISSN: 1359-8368. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.09.049>

Conflicto de interés

Los autores declaran que no hay conflictos de intereses

Contribución de los autores

José Luis García Bello: concibió, estructuró y contribuyó en la escritura del artículo científico. Realizó revisión bibliográfica.

Taira Teresa Batista Luna: realizó una revisión bibliográfica que facilitó la escritura del artículo científico. Contribuyó en la escritura del artículo científico.

Narciso Antonio Villar Goris: realizó una revisión bibliográfica que facilitó la escritura del artículo científico. Contribuyó en la escritura del artículo científico.

Héctor Manuel Camué Ciria: concibió, estructuró y escribió el artículo científico. Realizó revisión bibliográfica.

Denia Cid Pérez: contribuyó en la escritura del artículo científico.