

## Estructuras de carbono a escala nanométrica: un análisis a los alótropos y sus aplicaciones potenciales

César Alán González Wallmark<sup>a</sup>, Carlos Alfredo Castro Chávez<sup>a</sup>, Marinthia Jaqueline Estrada López<sup>a</sup>, Mónica Yolotzin Velasco Gómez<sup>a</sup>, Gerardo Manuel Garza López<sup>a\*</sup>

<sup>a</sup> Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Universidad Autónoma de Nuevo León, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México.

\*e-mail de autor responsable: [manuel.garzalpz@uanl.edu.mx](mailto:manuel.garzalpz@uanl.edu.mx)

Recibido 01 de Abril de 2024, Aceptado: 28 de Junio de 2024

### Resumen

El análisis de los materiales a diferentes escalas proporciona una perspectiva única de cómo se constituyen e interactúan en distintos medios para su mejora e implementación. La nanotecnología es la ciencia que estudia todo aquello que se relaciona con la escala nanométrica, otorgando grandes oportunidades para mejorar materiales mediante técnicas de síntesis y caracterización, las cuales han evolucionado rápidamente en comparación con otros avances tecnológicos. El artículo de revisión presenta una introducción a esta ciencia, enfocándose en las diversas nanoestructuras de carbono conocidas y utilizadas actualmente, ofreciéndole al lector un panorama para apreciar su relevancia, incluyendo su uso actual en distintos campos. Sus aplicaciones, financiamiento y resultados son esenciales para comprender su utilidad. Pese a su falta de reconocimiento, estas estructuras se han convertido en elementos enriquecedores e influyentes en la era actual, siendo fundamentales para el progreso.

**Palabras Clave:** Nanotecnología, carbono, alotropía, síntesis y caracterización, aplicaciones.

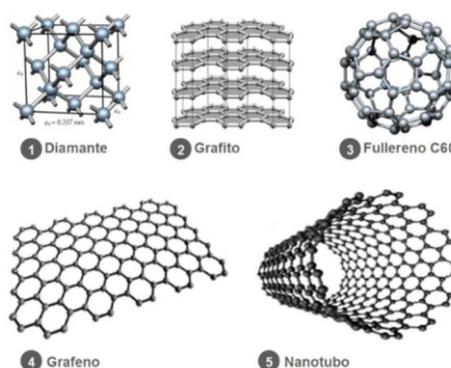
### Abstract

The analysis of materials at different scales provides a unique perspective on how they are constituted and interact in various environments, allowing for their improvement and implementation. Nanotechnology is the science that studies everything related to the nanometric scale, offering great opportunities to enhance materials through synthesis and characterization techniques, which have evolved rapidly compared to other technological advances. This review presents an introduction to this science, focusing on the various carbon nanostructures currently known and used, offering the reader a broad perspective to appreciate their relevance, including their current use in different fields. Their applications, funding, and outcomes are essential for understanding their utility. Despite their lack of recognition, these structures have become enriching and influential elements in the current era, serving as fundamental pillars of progress.

**Keywords:** Nanotechnology, carbon, allotropy, synthesis and characterization, applications.

## 1. Introducción

Entre los elementos conocidos actualmente, el carbono, proveniente del interior de estrellas masivas mediante el proceso triple alfa, destaca del resto por su versatilidad, abundancia y relación con la vida como es conocida. Numerosas investigaciones realizadas a lo largo del tiempo trajeron como resultado una mejor comprensión de este y del valor que se le puede dar. Su estudio a mayor detenimiento en cada una de sus hibridaciones dio paso al conocimiento en sus distintas formas alotrópicas, destacando carbonos cristalinos como lo son el grafito y el diamante (**Figura 1**). La formación de este elemento puede variar, determinando el tipo de estructura que obtendrá, por ello se presenta tanto de forma amorfa como cristalina, enriqueciendo su potencial en aplicaciones como lo es el caso de los nanotubos de carbono en la fabricación de células fotovoltaicas más eficientes.



**Figura 1.** Estructuras alotrópicas del carbono en distintas dimensiones [26].

La alotropía es un fenómeno que describe la existencia de diferentes formas de un mismo elemento químico en un mismo estado físico, manifestándose de manera destacada en el carbono. Tradicionalmente conocido por sus alótropos principales, el diamante y el grafito, el carbono ha revelado nuevas estructuras, elevando su diversidad alotrópica a por lo

menos cuatro formas principales, entrando en las dimensiones 0D, 1D, 2D y 3D.

Según la CCRSERI, se le conoce como nanotecnología a la ciencia que actúa en áreas como el diseño, producción e incluso en el empleo de estructuras y objetos, los cuales posean por lo menos una de sus dimensiones en la escala de 100 nanómetros o menos. Los descubrimientos del carbono se han llevado a cabo mediante esta ciencia, siendo este elemento un importante objeto de estudio debido a las propiedades que ofrece en sus distintas formas, implementando los materiales creados en una gran cantidad de aplicaciones según se requiera.

Algunas de sus aplicaciones van enfocadas en el medio ambiente y la salud, observando la implicación de los países en el uso de la nanotecnología para la solución de problemáticas que engloben estos temas. En Europa se desarrollaron algunos proyectos como MONOCAT (Reactores monolíticos nano y micro estructurados para purificación catalítica de agua), WATERMIM (Tratamiento de agua por materiales impresos molecularmente), NEW ED (Electrodialisis de membrana bipolar para la remediación de corrientes residuales de alta salinidad), NANOGLOWA (Nanomembranas contra el calentamiento global) y CARMOF (Nuevo proceso para la captura eficiente de CO<sub>2</sub> mediante adsorbentes innovadores basados en nanotubos de carbono modificados y MOFs), por mencionar algunos, los cuales fueron proyectos desarrollados en el 7° Programa Marco de Investigación y Desarrollo Tecnológico (7PM) y Programa Horizonte 2020 de la Unión Europea [28], enfocados en la limpieza del suelo, agua y aire mediante el uso de nanomateriales de carbono a través de sus respectivas técnicas de adsorción y filtración.

Por otro lado, existen distintos centros de investigación en otros países como Brasil, Argentina, Colombia y Chile, en donde ciertas universidades se centran en estudio o desarrollo de nanomateriales ya sea mediante el uso de nanotubos o nanofibras de carbono. En lo que respecta a proyectos en México, pese a no ser tan mencionados como otras áreas o descubrimientos entre el público general, existen publicaciones sobre el desarrollo de la nanotecnología en el país, incluyendo a su vez apoyo del gobierno para su elaboración, por ello, universidades como la UNAM o centros de investigación como el CIMAV se encuentran explorando el uso de aplicaciones potenciales con nanomateriales de carbono en el alcance de la catálisis.

Con información recabada del CONAHCYT se puede encontrar información sobre el financiamiento de proyectos en nanotecnología, los cuales fueron aprobados en años pasados por los Fondos Mixtos (FOMIX) y por el Fomento Regional para el Desarrollo Científico, Tecnológico y de Innovación (FORDECyT). Existen distintas modalidades en las cuales se categorizan los proyectos, como lo es la investigación básica y aplicada, formación de recursos humanos, creación y fortalecimiento de infraestructura, incluso una parte se enfoca en la divulgación científica. Aunque no todos los proyectos

fueron englobados en el carbono, aún logró ser uno de los principales en cuanto a materia prima, teniendo un total de 9 proyectos y con un monto financiado de \$10,557,214. En la **Tabla 1** se muestra a mayor detalle los fondos otorgados de cada estado.

**Tabla 1.** Fondos totales para proyectos de nanotecnología por Fomix, base de información del Conahcyt (2020). [9]

Estados que otorgaron fondos para nanotecnología	Total otorgado (pesos)	%	Total otorgado entre 2008 y 2010 (pesos)
Estados con menos del 3% de los fondos	27,338,781	14	17,227,896
Chihuahua	6,092,477	2	4,954,476
Guanajuato	8,445,964	5	1,796,964
Morelos	9,100,750	5	6,000,000
Yucatán	20,000,000	11	20,000,000
Nuevo León	118,603,350	63	91,100,220
<b>Total</b>	<b>189,581,322</b>	<b>100</b>	<b>141,079,557 (74.4%)</b>

Un ejemplo importante del país es el de la síntesis y explotación del grafeno e híbridos, el cual se encuentra a cargo del CIQA (Centro de Investigación de Química Aplicada) en Saltillo, Coahuila, siendo la sede del Laboratorio Nacional de Materiales Grafénicos (LNMG). Su trabajo tiene como objetivo la fabricación de prototipos para lograr obtener una celda solar orgánica o híbrida, hecha completamente de materiales grafénicos. Incluso, en Abril del 2024, se llevó a cabo el coloquio “Sinergias: México en la frontera del conocimiento”, donde se difundieron los resultados de trabajos en múltiples áreas e instituciones, presentando entre ellos el proyecto “Analogías en la física de sistemas 2D rotados: de escala atómica a nanométrica”, que involucra al carbono para darle un mejor entendimiento [7].

Si bien es cierta la existencia de su variada cantidad de estructuras que abarcan desde la escala nanométrica y no nanométricas, como lo son los nanocuernos y nanoconos de carbono, siendo variaciones del nanotubo, los CNO, la lonsdaleíta (un alótropo que se diferencia del diamante por su estructura hexagonal que lo hace más fuerte) entre otros, se indagará principalmente en aquellas que entren dentro de la escala nanométrica y las más destacadas que existen.

## 2. Clasificación de los nanomateriales

La clasificación de los nanomateriales puede abordarse de diversas maneras, considerando sus características y origen. Inicialmente, se pueden clasificar según su fuente, distinguiendo entre nanomateriales de origen natural y artificial. Estos materiales pueden surgir como productos finales deseados o como subproductos de distintos procesos. Además, se dividen en orgánicos e inorgánicos. En el ámbito natural, las nanopartículas se generan en eventos como erupciones volcánicas, incendios forestales, aerosoles salinos y granos ultrafinos de arena mineral, como óxidos y

carbonatos. Por otro lado, en el ámbito artificial, algunas partículas ultrafinas se producen involuntariamente a través de actividades humanas, como la combustión de combustibles fósiles, la preparación de alimentos en barbacoas, o bien, de forma intencional mediante técnicas y métodos capaces de manipular la materia a nivel atómico y molecular.

Otra forma de clasificar los nanomateriales se basa en su tipo, diferenciando entre nanomateriales basados en carbono, nanomateriales inorgánicos, nanomateriales orgánicos excluyendo los de carbono, y nanomateriales compuestos.

Asimismo, se pueden categorizar según su dimensionalidad (tamaño), morfología (forma), propiedades de superficie, composición, uniformidad, funcionalización y grado de aglomeración. Esta clasificación detallada facilita una mejor comprensión y aplicación de los nanomateriales.

### 3. Clasificación por dimensionamiento

Los materiales 0D, 1D y 2D son clasificaciones utilizadas para describir diferentes tipos de estructuras de carbono a escala nanométrica. Estas clasificaciones se basan en las dimensiones y formas de los materiales.

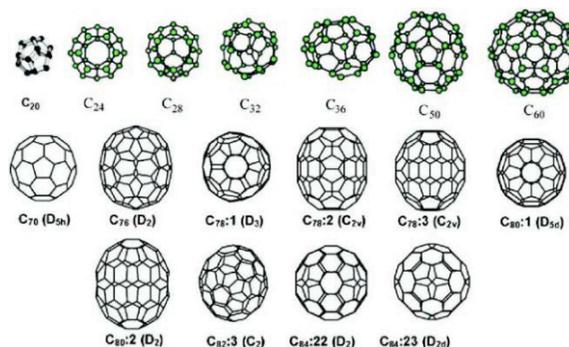
- **Materiales 0D:** Estos materiales son partículas que tienen su longitud, anchura y altura dentro del rango nanométrico. A menudo se les llama nanopartículas. Algunos ejemplos de materiales de carbono 0D incluyen pequeños fullerenos y puntos de carbono.
- **Materiales 1D:** Dentro de las características de estos materiales es que cuentan con forma de filamentos o tubos largos. Tienen un diámetro nanométrico y una longitud que supera los 100 nm y que incluso puede llegar a las micras. Los nanotubos de carbono y los “nanorods” son ejemplos de materiales de carbono 1D.
- **Materiales 2D:** Estos materiales se caracterizan por ser láminas delgadas o películas que tienen un grosor nanométrico. El grafeno, una sola capa de átomos de carbono dispuestos en una estructura hexagonal, es el ejemplo más conocido de un material de carbono 2D. Otros ejemplos incluyen el óxido de grafeno y los dicalcogenuros de metales de transición (TMD).

## 4. Estructuras de carbono

### Fullerenos

Reportados por primera vez en 1985 por investigadores de Rice University, Houston, Texas. Los fullerenos son estructuras esféricas o elipsoidales formadas por átomos de carbono dispuestos en patrones hexagonales y pentagonales. Su forma tridimensional única y propiedades fotónicas y electrónicas los hacen útiles en aplicaciones como la nanomedicina, la electrónica molecular y la catálisis.

El buckminsterfullereno (C<sub>60</sub>) es el ejemplo más conocido, exhibiendo propiedades fotónicas y electrónicas únicas. Estos fullerenos (**Figura 2**) se emplean en una variedad de aplicaciones, desde dispositivos fotovoltaicos y catalizadores hasta sensores, y encuentran uso en aplicaciones médicas como agentes de contraste en resonancia magnética [19].

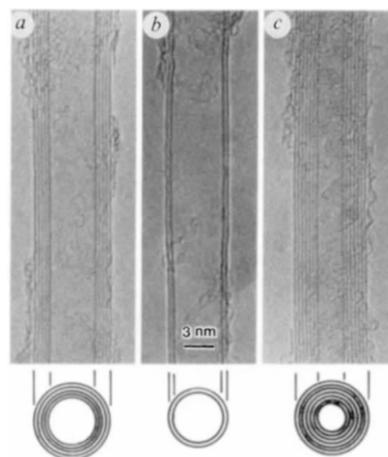


**Figura 2.** Tipos comunes de fullerenos [38].

### Nanotubos de Carbono

Reportados por primera vez en 1991 por Sumio Iijama (**Figura 3**). Los nanotubos de carbono se describen comúnmente como cilindros huecos, aunque su proceso de fabricación no sigue exactamente esta estructura. La noción de que están formados por una lámina de grafeno enrollada es ampliamente difundida, ya que esta representación sirve como un modelo simplificado para su estudio y comprensión.

Los nanotubos de carbono pueden tener diferentes estructuras, como nanotubos de pared simple, nanotubos de pared doble y nanotubos de pared múltiple. Estos nanotubos exhiben propiedades únicas, como una alta resistencia mecánica, conductividad eléctrica y capacidad para transportar moléculas, lo que los hace ideales para aplicaciones en nanotecnología, medicina y materiales avanzados.



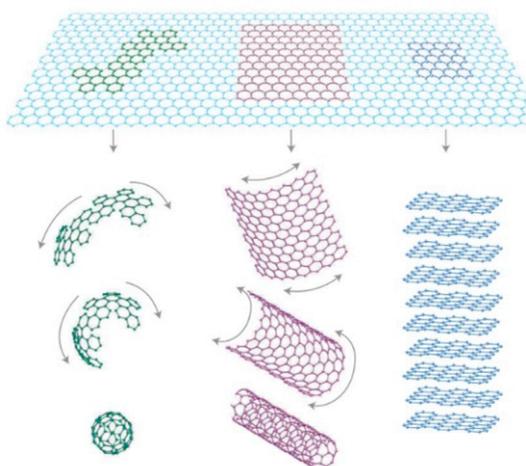
**Figura 3.** Primera imagen reportada por Sumio Iijama en su artículo llamado “Helical microtubules of graphitic carbon” [15].



## Grafeno

Su descubrimiento llevó a Andre Geim y Konstantin Novoselov a ganar el premio Nobel en el 2010. El grafeno (**Figura 4**) se caracteriza por ser una lámina de carbono bidimensional donde los átomos están organizados en una estructura hexagonal [11].

Su grosor monoatómico o monocapa le confiere propiedades como alta resistencia mecánica, alta conductividad eléctrica y térmica, lo cual lo convierte en un material prometedor y de gran interés para aplicaciones electrónicas, como transistores de alta velocidad, sensores altamente sensibles, materiales compuestos avanzados y dispositivos electrónicos flexibles [35].



**Figura 4.** Madre de todas las formas gráficas. Se puede envolver en Fullerenos 0D, enrollarlo en nanotubos 1D o apilarse en grafito 3D [30].

## Carburos de Carbono

Los carburos de carbono son compuestos formados por átomos de carbono y uno o más elementos metálicos. A nivel nanométrico, los carburos de carbono pueden presentar una variedad de estructuras, como nanopartículas, nanotubos y nanoalambres. Estos materiales exhiben propiedades, como una alta dureza, resistencia al desgaste y conductividad térmica, lo que los hace adecuados para aplicaciones en la industria de materiales y electrónica [33].

## Otras Estructuras de Carbono

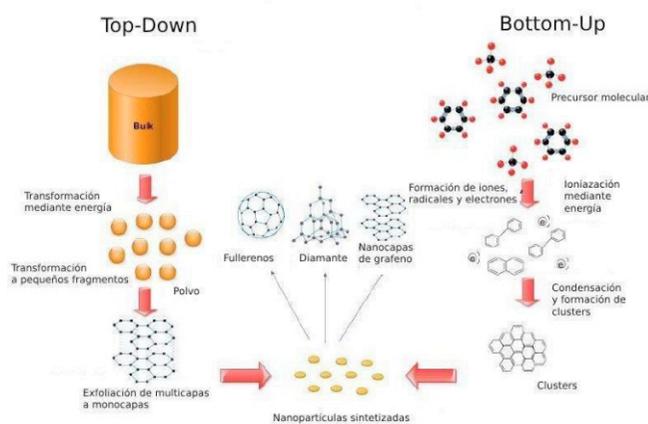
Además de los alótropos mencionados anteriormente, existen otras estructuras de carbono que merecen atención. Como el diamante, el carbono amorfo y las estructuras carbonosas derivadas de fuentes biológicas, como el carbón activado y el grafeno derivado de óxido de grafeno.

## 5. Síntesis

A lo largo de los años, el crecimiento en la investigación y en el número de laboratorios alrededor del mundo relacionados con nanotecnología ha permitido expandir el conocimiento en técnicas de síntesis y diseño de setups experimentales para la obtención de materiales nanoestructurados, permitiendo desarrollar metodologías a través de los cuales se obtienen propiedades a la carta, es decir, las características resultantes son controladas a partir de las variables iniciales [6, 36].

En general, existen 2 grandes clasificaciones para los procesos de síntesis de nanomateriales. En primer lugar, se tiene las técnicas top-down (de arriba hacia abajo), que, como su nombre indica, parte del material en bulk hasta obtener nanoestructuras. Aquí podemos encontrar técnicas como exfoliación mecánica, ablación láser o litografía. Por el lado contrario, la segunda clasificación es bottom-up (de abajo hacia arriba) donde se parten de precursores químicos que al reaccionar forman el nanomaterial deseado (**Figura 5**), encontrando metodologías como sol-gel, deposición química de vapor (CVD) o autoensamblaje [4, 41].

Centrando la atención en los métodos de síntesis que permitieron por primera vez la obtención de nanoestructuras de carbono, se tienen técnicas como evaporación lenta de grafito para la obtención de fullerenos [19], descarga de arco para la síntesis nanotubos de carbono [15] y exfoliación mecánica para la obtención de grafeno [25].



**Figura 5.** Síntesis Top-Down vs Bottom Up. Adaptado de: [13].

Una de las técnicas de síntesis que ha sido foco de atención recientemente debido a que recibió el premio Nobel de química en el año 2023 debido a su gran aportación, tanto a la ciencia como a la industria, fue la síntesis de puntos cuánticos (Quantum Dots) (**Figura 6**), por parte de Moungi Bawendi, Louis Brus y Alexei Ekimov [40]. Esta metodología de síntesis fue llamada “Crecimiento de semiconductores coloidales”, dicha técnica consistió, como su nombre lo indica, en el crecimiento de nanocristales dentro de una matriz, en este caso vidrio, para lo cual, se calentó una solución coloidal de nanopartículas semiconductoras hasta evaporar el solvente. Posteriormente, se baja la temperatura, proceso en el cual las nanopartículas se aglomeran, formando los nanocristales, siendo estos depositados en vidrio, solidificando esta matriz y

“encapsulando” los puntos cuánticos para lograr su estabilización [24].



Figura 6.- Muestras de puntos cuánticos [20].

El empleo de cada tipo de síntesis dependerá de las propiedades finales que se desean obtener, así como de los reactivos y equipos con los que se cuenten en el laboratorio, debido a que las ventajas y desventajas de cada aproximación, como el requerimiento energético o el control de las propiedades guiaría la metodología a seguir [16].

## 6. Caracterización

Una de las etapas de investigación más importantes es el proceso de caracterización, debido a que es aquí donde se experimentará y evaluará el nanomaterial obtenido para determinar sus características, tales como tamaño, rugosidad, estructura, propiedades optoelectrónicas o electroquímicas, de las cuales dependerá la viabilidad para la aplicación deseada o la problemática donde puede ser empleado.

Existen una gran variedad de equipos y técnicas que permiten caracterizar nanomateriales, las cuales, permiten obtener diversos datos que revelan la “huella dactilar” del objeto de investigación. Algunos permiten observarlo de forma indirecta, tales como las microscopías electrónicas, otros permiten conocer su composición, como la espectroscopia fotoelectrónica de rayos X, o determinar si el material sintetizado es el deseado a través de sus propiedades ópticas, con la espectroscopia ultravioleta-visible. En conjunto, el empleo de estas técnicas permite revelar el cambio de propiedades que sufren los materiales al cruzar la barrera macroscópica y entrar a la escala nanométrica.

Iniciando con las técnicas que permiten “ver” el nanomaterial, se tienen las microscopías, tales como la Microscopía Electrónica de Transmisión y Microscopía Electrónica de Barrido (TEM y SEM, por sus siglas en inglés, respectivamente). Ambas técnicas permiten obtener imágenes del material a analizar, radicando su principal diferencia en el tipo de imagen, mientras que con TEM se observa la estructura interna, con SEM se observa la morfología superficial, presentado en la **Figura 7**. Dentro de esta misma

clasificación se encuentra el Microscopio de Fuerza atómica (AFM, por sus siglas en inglés), el cual permite observar la topografía del nanomaterial analizado, obteniendo rugosidad, altura o defectos presentados, todo esto a partir de las diferencias en las fuerzas repulsivas de Bohr, Van der Waals, entre todas [18].

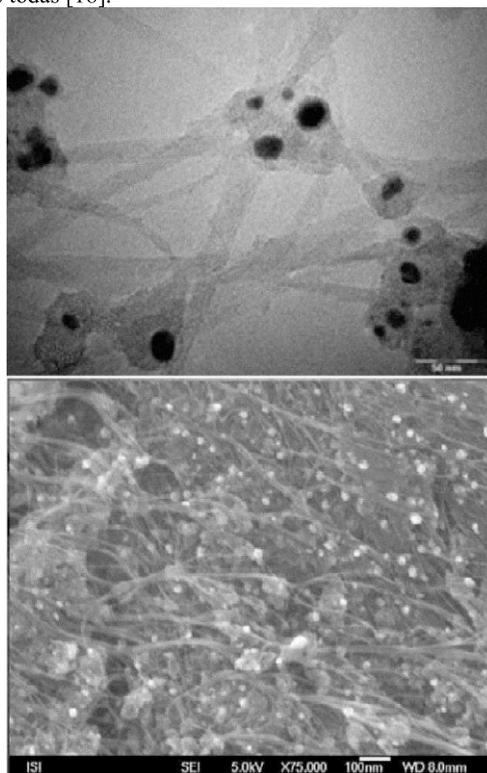


Figura 7.- Micrografías de TEM y SEM de nanotubos de carbono [32].

Posteriormente se encuentran las técnicas que permiten determinar características del propio material, tales como composición química, enlaces presentes, rugosidad, comportamiento óptico, etc.

La Espectroscopia Ultravioleta-Visible permite, a través del análisis del comportamiento óptico del material, determinar la correcta síntesis de dicha estructura, longitudes de onda de excitación y emisión, además de su composición. El proceso de funcionamiento es presentado en la **Figura 8** [18].

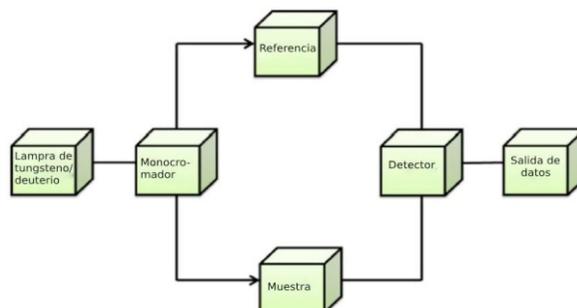


Figura 8.- Funcionamiento de Espectroscopia UV-Vis. Adaptado de: [18].

**Espectroscopia Raman:** Esta técnica se basa en el comportamiento de la luz y la vibración de los enlaces moleculares, permitiendo obtener señales características para cada tipo de enlace presente en la muestra [5, 21]. Normalmente opera mediante un láser en la región cercano al infrarrojo (NIR) o del espectro electromagnético visible, emitiendo una única longitud de onda de luz específica. Este mide la energía dispersada posteriormente de ser excitada mediante el láser. Es importante no confundir esta técnica con la Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR, por sus siglas en inglés), que a pesar de basarse ambas en los modos vibracionales de las moléculas, Raman lo hace mediante la dispersión inelástica de la luz, obteniendo información sobre las estructuras moleculares, mientras que FTIR lo hace mediante la absorción del espectro electromagnético en la región infrarroja la cual induce la vibración de los enlaces, obteniendo información de los grupos funcionales [17].

**Espectroscopia de Fotoemisión de Rayos X (XPS):** Dicha técnica debe su funcionamiento al efecto fotoeléctrico descubierto por Albert Einstein [8], el cual basa su fundamento en la irradiación de rayos X, para posteriormente excitar a los electrones de los átomos superficiales y obtener una señal, en forma de energía, que es característica de elementos químicos. De esta forma se obtiene información de los elementos presentes en la superficie del material [12, 18].

Las técnicas presentadas anteriormente son algunas de la gran variedad existentes. En general, la determinación del tipo de caracterización a realizar será guiada a partir de la información que se desee conocer del nanomaterial obtenido.

## 7. Aplicaciones de nanoestructuras de carbono

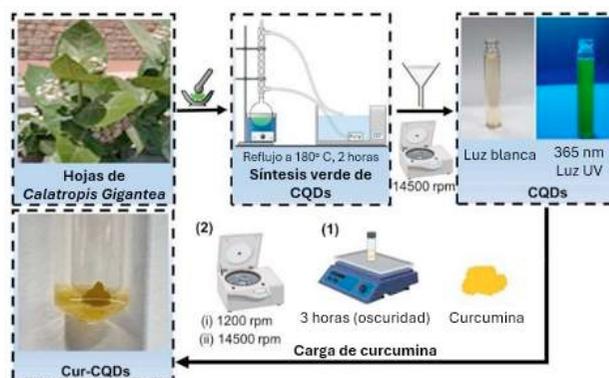
### Puntos cuánticos de carbono

Existe una alta variedad de aplicaciones para los puntos cuánticos de carbono gracias a las propiedades que estos presentan, siendo su estabilidad, biocompatibilidad y baja toxicidad algunos ejemplos de ellas. Por ende, hay un gran potencial para diferentes áreas de la investigación, pudiendo ser usados para entrega de fármacos, biosensado, fotocatalisis, entre otras aplicaciones [2].

Los puntos cuánticos de carbono han sido previamente utilizados en la elaboración de un sensor electroquímico para la detección del cáncer de mama. Esto se logra mediante la detección del biomarcador HER2, la cual es una proteína ligada con este tipo de cáncer, siendo común su consideración para la elaboración de biosensores. La detección se lleva a cabo gracias a señales eléctricas generadas en un electrodo por las interacciones anticuerpo-antígeno de

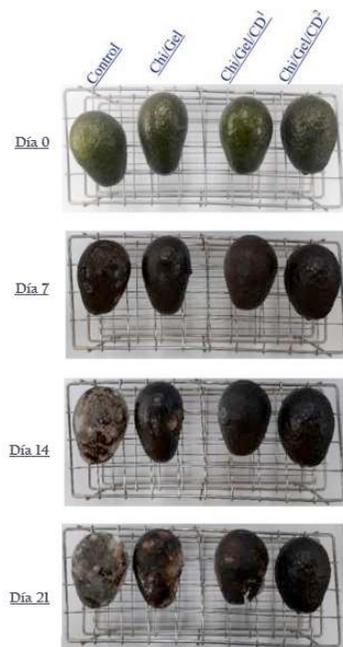
HER2. Los puntos cuánticos están recubiertos por el antígeno y gracias a ellos hay una mayor eficiencia de transferencia de carga, mostrando una buena actividad catalítica para el sensor [2].

Otra aplicación contra el cáncer se basa en el uso de estos puntos cuánticos como nano acarreadores de fármacos. Esto se puede ver en el artículo publicado por Himanshu Y. et. al. [37] donde el fármaco antitumoral curcumina es adsorbido por puntos cuánticos de carbono. Se hizo este experimento ya que la curcumina presenta poca biodisponibilidad y absorción, además de ser hidrofóbica. Mediante esta adsorción se logró un aumento en la solubilidad del fármaco, esto debido a los grupos funcionales presentes en los puntos cuánticos, siendo estos -OH y -NH. Otra ventaja del uso de puntos cuánticos es su síntesis, la cual es lograda mediante una síntesis verde a partir de hojas de *Calotropis Gigantea*. En la **Figura 9** se puede ver el esquema usado para representar la síntesis en el experimento.



**Figura 9.** Esquema de síntesis verde de puntos cuánticos de carbono y la carga de curcumina [37].

Además de su uso en la medicina, los puntos cuánticos de carbono también pueden ser usados en la industria alimentaria. Se puede denotar el artículo publicado por Parya E. et. al. [10] donde se usaron estas estructuras para la fabricación de empaques de aguacate. Estas películas de empaque fueron fabricadas usando el compuesto quitosano/gelatina y añadiendo estos puntos cuánticos. Los beneficios se resumen en una actividad antioxidante alta y el aumento de actividad antibacteriana dada la generación de especies de oxígeno reactivas gracias a los puntos cuánticos. En la **Figura 10** se puede ver el crecimiento de moho durante 21 días en diferentes grupos experimentales, mostrando que tanto el compuesto quitosano/gelatina y el mismo compuesto con diferentes porcentajes de peso de puntos cuánticos de carbono presentan mejores propiedades de conservación.



**Figura 10.** Prueba de conservación de aguacate frente a moho durante un período de 21 días [10].

### Nanotubos de carbono

Desde su descubrimiento las aplicaciones teóricas y prácticas de los nanotubos de carbono han cubierto diferentes campos de la industria, llegando a ser una tendencia en el mundo de la investigación. Una de su área de aplicación se encuentra en el tratamiento de agua. Estas estructuras han sido usadas para generar compósitos como el visto en el artículo de Ge Ma et. al. [22] donde se genera un nano compósito de nanotubos de carbono multipared con dióxido de titanio para la descontaminación de compuestos orgánicos en agua mediante fotocatalisis. Los nanotubos presentan una gran área superficial y capacidad de adsorción del contaminante usado (Naranja de metilo). Además, el dióxido de titanio es depositado en los nanotubos para evitar aglomeraciones e incrementar la actividad fotocatalítica de este material necesaria para la descontaminación. Cabe mencionar que el proceso fotocatalítico es apoyado por la conductividad que presentan los nanotubos de carbono.

Otras aplicaciones de los nanotubos se pueden ver en el campo automotriz. En el artículo publicado por H.J. Hwang et. al. se determina el efecto de nanotubos de carbono en materiales de fricción en frenos. Se concluyó que con el uso de estas nanoestructuras en estos materiales mejoró la resistencia al “fading”, el cual es un fenómeno que ocurre con el sobrecalentamiento en el sistema de frenado y disminuye la capacidad para frenar en un automóvil. Además, se vio que debido al reforzamiento por nanotubos se aumentó la estabilidad de fricción. Sin embargo, un efecto negativo fue la disminución de efectividad de fricción, lo que se

atribuye a la lubricación generada por los manojos no dispersados de los nanotubos [14].

El uso de los nanotubos de carbono en el área automotriz no abarca solamente los frenos. Diferentes tipos de sistemas en un automóvil pueden ser beneficiados con la adición de nanotubos. Un ejemplo de esto es el sistema de refrigeración en los radiadores de un auto. La carga calorífica que recibe el líquido refrigerante en motores modernos ha aumentado con el pasar del tiempo, por lo que se buscan maneras optimizadas de disipar el calor de una manera más eficiente. Una opción es añadir nanotubos de carbono multipared al líquido refrigerante y se puede ver en el artículo publicado por V. Srinivas, Ch. V. K. N. S. N. Moorthy [34] donde se lleva a cabo este experimento con agua desionizada con ácido sebáico y nanotubos de carbono multipared como aditivos. En el experimento se vio como la adición de los nanotubos al líquido ayudaba a aumentar el coeficiente de transferencia de calor, además de evitar algún daño por corrosión al sistema.

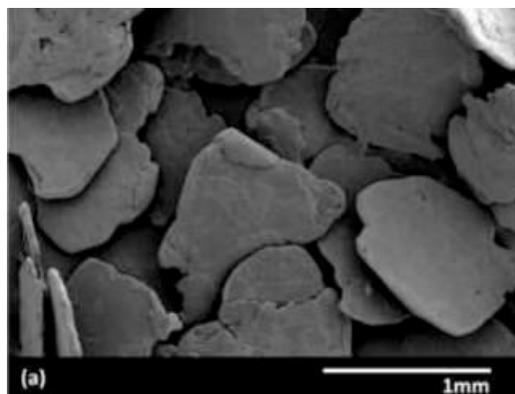
### Grafito

El grafito tiene amplias aplicaciones en la nanotecnología ya que posee una estructura cristalina formada por capas de átomos de carbono dispuestos en forma hexagonal. Esta disposición confiere al grafito su alta conductividad eléctrica y térmica [39].

Una de las aplicaciones del óxido de grafito dopado con carbonato de plata aplicado como fotocatalizador. Uno de los procesos de remediación rentables es la fotocatalisis con óxidos semiconductores utilizados para resolver problemas de contaminación. El catalizador OG tiene el mejor desempeño fotocatalítico, la reacción fotocatalítica ocurre en la superficie del catalizador y, por lo tanto, se espera una buena capacidad de adsorción que favorezca la cinética de la reacción [39].

Otra de las aplicaciones es para el control térmico siendo que el grafito es uno de los materiales que combinan un determinado grado de porosidad con elevada conductividad térmica son buenos para aplicaciones térmicas.

En este caso se utilizaron espumas Gf/Al se fabricaron por el método de replicación utilizando como preforma una mezcla compactada de copos de grafito (**Figura 11**) y partículas de cloruro sódico. Los Gf presentes en estas espumas resultan ser inclusiones térmicas efectivas [23]



**Figura 11.** Imágenes de microscopía electrónica de barrido de los materiales utilizados: copos de grafito. [33].

La gestión de energía se plantea como otra de sus aplicaciones debido a la baja capacidad teórica del grafito (372 mAh/g) hace imprescindible la búsqueda de sustitutos como el silicio, cuya capacidad teórica puede alcanzar los 3500 mAh/g. [34]

Se plantea que el grafito (Figura 12) se emplearía en la fabricación de electrodos para baterías recargables, contribuyendo a la capacidad de almacenamiento de energía y a la eficiencia de las baterías [29].

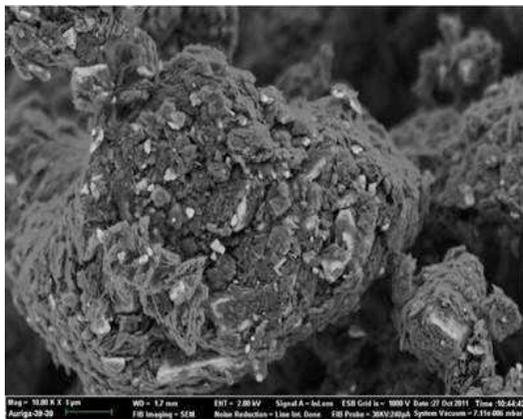


Figura 12. Imágenes del grafito-silicio [29].

### Grafeno

El grafeno debido a su estructura cristalina y a la movilidad de los electrones entre las capas tiene distintas aplicaciones. Una de sus aplicaciones es almacenamiento de energía, parecida a la anterior que se mencionó con el grafito.

Donde se han empleado diferentes tipos de grafeno en sistemas electroquímicos de almacenamiento de energía, desde el grafeno pristino, obtenido a partir de exfoliación de grafito, hasta el óxido de grafeno (GO) u óxido de grafeno reducido (rGO). Esto es debido a que iones (como  $\text{Li}^+$  o  $\text{Na}^+$  en baterías metal-ion), almacenan cargas electrostáticas en el electrodo de doble capa (como en los condensadores de doble capa), o actuando como catalizador en baterías metal-aire (Figura 13). El grafeno también puede jugar un rol importante en los dispositivos de almacenamiento de energía incluso sin participar en la reacción electroquímica [1].

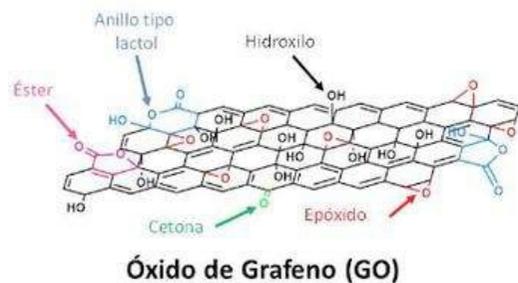


Figura 13. Esquema de la estructura molecular del óxido de grafeno [27].

Una de las aplicaciones más importantes es como un biosensor, el grafeno puede utilizarse como uno para la detección de dichas biomoléculas gracias a las propiedades que le confieren (Figura 14).

Se pueden detectar moléculas como el peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), residuo metabólico celular que posee una elevada toxicidad y debe transformarse en compuestos menos perjudiciales. Se han realizado modificaciones de este nanomaterial, lográndose obtener una detección más sensible (hasta 0,02mM) que la realizada utilizando otros métodos más tradicionales.

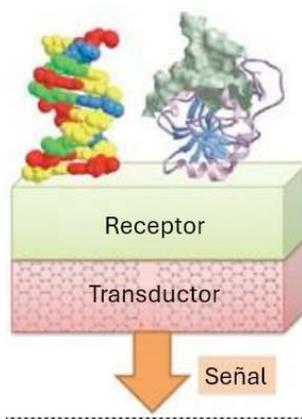


Figura 14. Esquema de un biosensor. El biosensor consiste en una capa receptora, que consiste en una biomolécula (por ejemplo, ADN o proteína), y un transductor, que es un material basado en grafeno [27].

Otra de sus aplicaciones es orientada a la terapia genética. El principal impedimento de dicha terapia es el desarrollo de vehículos de suministro de genes seguros y eficientes, en los que suelen participar los nanomateriales. Por lo tanto, distintos estudios han confirmado al grafeno como un novedoso nanovector bidimensional para la carga y la transfección de genes.

Más específicamente el óxido de grafeno (GO) cargado negativamente es el que posee la capacidad de unirse a los polímeros catiónicos de la PEI mediante interacciones electrostáticas formando complejos estables de GO-PEI (Figura 15). Estos complejos muestran cargas positivas que permiten una carga efectiva del plásmido de ADN (pDNA) a través de un proceso de ensamblaje capa por capa (LBL) [27].

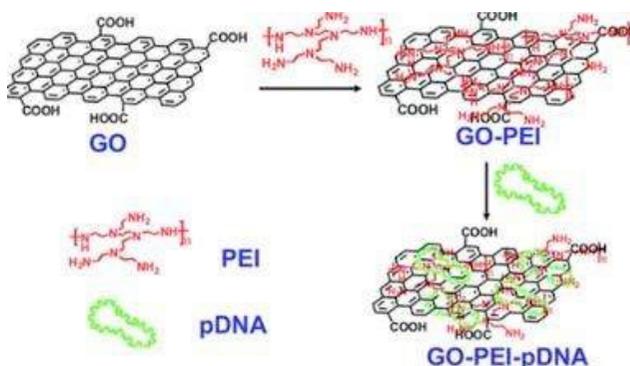


Figura 15. Síntesis de los complejos GO-PEI-DNA mediante un proceso de ensamblaje LBL. Primero, GO es funcionalizado no

covalentemente por polímeros PEI (GO-PEI con carga positiva). A continuación, el ADP (carga negativa) es cargado en los complejos GO-PEI también por interacciones electroestáticas [27].

## Carbón activado

El carbón activado se caracteriza por su estructura altamente porosa, lo que le confiere una gran área superficial y capacidad de adsorción de contaminantes y compuestos no deseados en diversos medios.

Una de sus aplicaciones radica en el área médica, siendo utilizada para el tratamiento de intoxicaciones y sobredosis, ya que es capaz de adsorber toxinas y compuestos nocivos en el tracto gastrointestinal. El carbón activado se considera actualmente el método de descontaminación gastrointestinal de elección en las intoxicaciones pediátricas (4-6). A pesar del cada vez mayor consenso internacional existente, la discrepancia de actuación en los hospitales de nuestro entorno sigue siendo patente [31].

El carbón activado puede utilizarse en la hemoperfusión o bien administrarse por vía oral en forma de dosis repetidas para realizar la denominada diálisis gastrointestinal [3].

## 8. Conclusiones

Las estructuras de carbono a escala nanométrica representan un fascinante campo de investigación con un potencial significativo para el desarrollo de materiales y dispositivos de vanguardia. Desde los fullerenos hasta los grafenos y nanotubos, estas formas alotrópicas exhiben propiedades únicas, impulsando una amplia e innovadora gama de aplicaciones en múltiples campos de gran importancia actual como lo son la electrónica, la medicina y la energía. A través de métodos de síntesis y caracterización cada vez más sofisticados, sus resultados demuestran un avance significativo en su comprensión y manipulación, ambas en periodos cortos de tiempo en comparación con otras ciencias y tecnologías.

El énfasis en esta escala a través de las últimas décadas ha impulsado su investigación en diversas áreas y países, reconociéndole de a poco su potencial e importancia mediante la concesión de financiamiento, tanto a los proyectos como los equipos necesarios.

La nanotecnología abarca un amplio margen de aplicaciones, de los cuales algunos no se han considerado ni descubierto puesto que el apoyo y la curiosidad no han llegado a ese nivel de profundidad. El carbono, un elemento abundante y versátil, ha brindado al ser humano una gran cantidad de aportes para su beneficio. Su uso individual y en conjunto con otros elementos a esta escala, pueden convertirse en la clave para la obtención de nuevos materiales con propiedades únicas, trayendo consigo una nueva era de dispositivos avanzados y tecnologías innovadoras.

## 9. Agradecimientos

Al Dr. Leonardo Chávez Guerrero por la revisión y apoyo en la elaboración del artículo para la clase de Fundamentos de la Nanotecnología, en el semestre Enero – Junio 2024.

## 10. ORCID Identificaciones

César Alán González Wallmark<sup>a</sup>  <https://orcid.org/0009-0002-6431-8344>

Carlos Alfredo Castro Chávez<sup>a</sup>  <https://orcid.org/0009-0002-3086-4822>

Marintha Jaqueline Estrada López<sup>a</sup>  <https://orcid.org/0009-0001-3806-2624>

Mónica Yolotzin Velasco Gómez<sup>a</sup>  <https://orcid.org/0009-0009-4796-8637>

Gerardo Manuel Garza López<sup>a\*</sup>  <https://orcid.org/0009-0007-4014-3574>

## 11. Referencias

- [1] Esteve Adell, I., Gil-Agustí, M., Zubizarreta, L., Quijano-López, A., & García-Pellicer, M. (2020). Aplicaciones del grafeno en sistemas de almacenamiento de energía. *Anales de Química de la RSEQ*, 116(4), 233–233.
- [2] Amir, H., Subramanian, V., Sornambikai, S., Ponpandian, N., & Viswanathan, C. (2024). Nitrogen-enhanced carbon quantum dots mediated immunosensor for electrochemical detection of HER2 breast cancer biomarker. *Bioelectrochemistry*, 155, 108589. <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2023.108589>
- [3] Armijo, J. A., & Valiente, R. (1998). Administración repetida de carbón activado en el tratamiento de las intoxicaciones. En *Bases del tratamiento de las intoxicaciones agudas* (pp. 17-32). Doyma, Barcelona.
- [4] Biswas, A., Bayer, I. S., Biris, A. S., Wang, T., Dervishi, E., & Faupel, F. (2012). Advances in top-down and bottom-up surface nanofabrication: Techniques, applications & future prospects. *Advances in Colloid and Interface Science*, 170(1–2), 2–27. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2011.11.001>
- [5] Bumbrah, G. S., & Sharma, R. M. (2016). Raman spectroscopy–Basic principle, instrumentation and selected applications for the characterization of drugs of abuse. *Egyptian Journal of Forensic Sciences*, 6(3), 209–215. <https://doi.org/10.1016/j.ejfs.2015.06.001>
- [6] Coccia, M. (2012). Evolutionary trajectories of the nanotechnology research across worldwide economic players. *Technology Analysis & Strategic Management*, 24(10), 1029–1050. <https://doi.org/10.1080/09537325.2012.705117>
- [7] Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (Conahcyt) (Ed.). (2024). *Coloquio Sinergias: México en la frontera del conocimiento*. Recuperado de <https://conahcyt.mx/evento/coloquio-sinergias-mexico-en-la-frontera-del-conocimiento>.
- [8] Einstein, A. (1905). On a heuristic viewpoint concerning the production and transformation of light. *Annalen der Physik*, 17, 132-148. <https://doi.org/10.1002/andp.19053220607>
- [9] Ortiz Espinoza, A., Foladori, G., & Záyago Lau, É. (2022). Financiamiento público para nanotecnologías: el caso de Fomix y Fordecyt. *Revista Legislativa de Estudios Sociales y de Opinión Pública*, 15(33), 149–168.
- [10] Ezati, P., Rhim, J.-W., Molaei, R., & Rezaei, Z. (2022). Carbon quantum dots-based antifungal coating film for active packaging application of avocado. *Food Packaging and Shelf Life*, 33, 100878. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2022.100878>

- [11] Geim, A., & Novoselov, K. (2007). The rise of graphene. *Nature Materials*, 6(183–191), 183–191. <https://doi.org/10.1038/nmat1849>
- [12] Gurker, N., Ebel, M. F., & Ebel, H. (1983). Imaging XPS—A new technique, I—principles. *Surface and Interface Analysis*, 5(1), 13–19. <https://doi.org/10.1002/sia.740050105>
- [13] Habiba, K., Makarov, V., Weiner, B., & Morell, G. (2014). Fabrication of nanomaterials by pulsed laser synthesis. In (pp. 263–291). <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.16446.28483>
- [14] Hwang, H. J., Jung, S. L., Cho, K. H., Kim, Y. J., & Jang, H. (2010). Tribological performance of brake friction materials containing carbon nanotubes. *Wear*, 268(3–4), 519–525. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2009.09.003>
- [15] Iijima, S. (1991). Helical microtubules of graphitic carbon. *Nature*, 354(6348), 56–58. <https://doi.org/10.1038/354056a0>
- [16] Iqbal, P., Preece, J. A., & Mendes, P. M. (2012). Nanotechnology: The “Top-Down” and “Bottom-Up” Approaches. En P. A. Gale & J. W. Steed (Eds.), *Supramolecular Chemistry* (1st ed., pp. 195–204). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470661345.smc195>
- [17] Johnston, C. T., & Aochi, Y. O. (1996). Fourier transform infrared and Raman spectroscopy. En *Methods of Soil Analysis: Part 3 Chemical Methods* (Vol. 5, pp. 269–321). <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c10>
- [18] Kaliva, M., & Vamvakaki, M. (2020). Nanomaterials characterization. En *\*Polymer Science and Nanotechnology\** (pp. 401–433). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816806-6.00017-0>
- [19] Kroto, H. W., Heath, J. R., O’Brien, S. C., Curl, R. F., & Smalley, R. E. (1985). C<sub>60</sub>: Buckminsterfullerene. *Nature*, 318(6042), 162–163. <https://doi.org/10.1038/318162a0>
- [20] Lhuillier, E., Steckel, J. S., Livache, C., & Reiss, P. (2023). Chemistry Nobel Prize celebrates colloidal quantum dots: Highly-engineered, spectrally pure light. *Photoniques*, 122, 18–20. <https://doi.org/10.1051/photon/202212218>
- [21] Lyon, L. A., Keating, C. D., Fox, A. P., Baker, B. E., He, L., Nicewarner, S. R., Mulvaney, S. P., & Natan, M. J. (1998). Raman spectroscopy. *Analytical Chemistry*, 70(12), 341–362. <https://doi.org/10.1021/ac9802032>
- [22] Ma, G., Zhu, Y., Zhang, Z., & Li, L. (2014). Preparation and characterization of multi-walled carbon nanotube/TiO<sub>2</sub> composites: Decontamination of organic pollutants in water. *Applied Surface Science*, 313, 817–822. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.06.079>
- [23] Maiorano Lauria, L. P., & Molina Jordá, J. M. (2018). Espumas metal/copos de grafito para aplicaciones de control térmico. *Revista de la Facultad de Ingeniería*, 27(2), 49–55.
- [24] Murray, C. B., Noms, D. J., & Bawendi, M. G. (1993). Synthesis and characterization of nearly monodisperse CdE (E = S, Se, Te) semiconductor nanocrystallites. *Journal of the American Chemical Society*, 115(19), 8706–8715. <http://dx.doi.org/10.1021/ja00072a025>
- [25] Novoselov, K. S., Geim, A. K., Morozov, S. V., Jiang, D., Zhang, Y., Dubonos, S. V., Grigorieva, I. V., & Firsov, A. A. (2004). Electric field effect in atomically thin carbon films. *Science*, 306(5696), 666–669. <https://doi.org/10.1126/science.1102896>
- [26] Ocampo Ruiz, E. (2011). Nanotecnología aplicada a la arquitectura: La investigación arquitectónica de nuevos materiales y sistemas constructivos como detonante en la creación de nuevos nichos laborales para el arquitecto. *Nova Scientia*, 3(5), 179–193.
- [27] Vélez Ortiz, J. M. (2016). Aplicaciones biomédicas del grafeno. *MoleQla: Revista de Ciencias de la Universidad Pablo de Olavide*, 21, 14.
- [28] Covadonga Pevida. *Nanomateriales (de carbono) que limpian*.
- [29] Piñuela-Noval, J., Fernández-González, D., Agostini, M., Suárez, M., Verdeja, L. F., Navarra, M. A., y Brutti, S. (2023). Composite grafito-silicio en aplicaciones de gestión de energía. Recuperado de <http://hdl.handle.net/10261/334837>
- [30] Rajan, R., Asok, A., Lekshmi, A. G., Appukkuttan, S., George, G., Wilson, R., y Joseph, K. (2024). Heterostructures based on zero-dimensional carbon-based nanostructures. En K. Joseph (Ed.), *Zero-Dimensional Carbon Nanomaterials* (pp. 385–409). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99535-1.00013-5>
- [31] Mintegui Raso, D. S., Benito Fernández, J., y Fernández Landaluce, A. (2003). Uso del carbón activado en las sospechas de intoxicación en urgencias de pediatría. *Archivos de Pediatría del Uruguay*, 74(3), 166–175.
- [32] Safarova, K., Dvorak, A., Kubinek, R., Vujtek, M., y Rek, A. (2007). Usage of AFM, SEM and TEM for the research of carbon nanotubes. *Modern Research and Educational Topics in Microscopy*, 2, 513–519.
- [33] Saleh, T. A. (2020). Nanomaterials: Classification, properties, and environmental toxicities. *Environmental Technology & Innovation*, 20, 101067. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101067>
- [34] Srinivas, V., Moorthy, C. V. K. N. S. N., Dedeepya, V., & et al. (2016). Nanofluids with CNTs for automotive applications. *Heat and Mass Transfer*, 52, 701–712. <https://doi.org/10.1007/s00231-015-1588-1>
- [35] Tahir, M. B., Sagir, M., & Rafique, M. (2021). Challenges and future of nanotechnology. En M. B. Tahir, M. Rafique, & M. Sagir (Eds.), *Nanotechnology* (pp. 141–142). Springer, Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-15-9437-3\\_6](https://doi.org/10.1007/978-981-15-9437-3_6)
- [36] Menéndez Velázquez, A. (2011). Una revolución en miniatura: Nanotecnología al servicio de la humanidad. *Universitat de València*.
- [37] Yadav, H., Rout, D., Upadhyaya, A. K., Agarwala, P., Sharma, A., & Sasmal, D. K. (2023). Carbon quantum dots for efficient delivery of curcumin in live cell. *Chemical Physics Impact*, 7, 100279. <https://doi.org/10.1016/j.chphi.2023.100279>
- [38] Yan, Q. L., Gozin, M., Zhao, F. Q., Cohen, A., & Pang, S. P. (2016). Highly energetic compositions based on functionalized carbon nanomaterials. *Nanoscale*, 8(9), 4799–4851. <https://doi.org/10.1039/C5NR07855E>
- [39] Ybieta Olvera, L. F., Cervantes Cuevas, H., Godínez García, A., Chávez Esquivel, G., Acosta Najarro, D. R., & De la O Gasca, M. (2019). Síntesis y caracterización de óxido de grafito dopado con carbonato de plata y su aplicación como fotocatalizador en la degradación del azul de metileno. Recuperado de [https://revistatediq.azc.uam.mx/Docs/revista\\_tendencias\\_2019.pdf](https://revistatediq.azc.uam.mx/Docs/revista_tendencias_2019.pdf) URI: <http://hdl.handle.net/11191/7832>
- [40] Yu, K., & Schanze, K. S. (2023). Commemorating The Nobel Prize in Chemistry 2023 for the Discovery and Synthesis of Quantum Dots. *ACS Central Science*, 9(11), 1989–1992. <https://doi.org/10.1021/acscentsci.3c01296>
- [41] Zhang, Z., Fraser, A., Ye, S., Merle, G., & Barralet, J. (2019). Top-down bottom-up graphene synthesis. *Nano Futures*, 3(4), 042003. <https://doi.org/10.1088/2399-1984/ab4e4f>