

Artículo de revisión

Puntos cuánticos de carbono: Un enfoque nanotecnológico para la encapsulación de fármacos

Johana Maldonado-Villamizar

Facultad Experimental de Ciencia y Tecnología, Universidad de Carabobo, Ciudad Universitaria Bárbara, Municipio Naguanagua, Venezuela. Práctica privada: Carrera 39 A # 18B Sur 154, El Poblado-Medellín, Colombia. Correo electrónico: johanamaria.mv@gmail.com

Recibido: 16 de junio de 2025

Corregido: 5 de septiembre de 2025

Aceptado: 9 de septiembre de 2025

<https://doi.org/10.15446/rcciquifa.v55n1.120972>

RESUMEN

Introducción: A la vanguardia de la nueva tendencia de las nanopartículas emergentes en la familia de nanomateriales carbónicos, los “Puntos cuánticos de carbono” se proyectan como una alternativa para múltiples aplicaciones biomédicas. Estos biomateriales a base de carbono con dimensiones inferiores a 10 nm se caracterizan por su emisión fluorescente. **Objetivo:** En el presente artículo se analizan los conceptos más relevantes de las nanopartículas tipo “Puntos cuánticos de carbono” como portadores de fármacos para aplicaciones terapéuticas. **Métodos:** La búsqueda incluyó las siguientes bases de datos especializadas PubMed/Medline, Cochrane Library, SciELO y el motor de búsqueda Google Scholar. Para la búsqueda se utilizó vocabulario controlado (MeSH y DeCS), empleando los términos definidos para esta revisión como “Nanoparticles”, “Nanotechnology”, “Nanomaterials”, “Quantum Dots”, “Carbon nanoparticles”, “Drug delivery systems”. **Hallazgos:** Los Puntos cuánticos de carbono al ser pequeñas nanopartículas fluorescentes pueden sintetizarse rápidamente mediante diversas rutas económicas y sencillas, lo que los convierte en una alternativa viable frente a otros nanomateriales fluorescentes. El uso de estas nanopartículas en la nanomedicina abarca el empleo de tecnologías de soporte o plantillas mediante la funcionalización o encapsulación de fármacos. Estas nanopartículas pueden imitar o modificar procesos biológicos, permitiendo abordar problemas asociados con la solubilidad, biodisponibilidad, inmunocompatibilidad y citotoxicidad de muchos de los medicamentos de uso tradicional. **Conclusión:** La aplicación de los “Puntos cuánticos de carbono” en futuras innovaciones en el campo de la nanomedicina podría generar entidades multifuncionales capaces de diagnosticar, tratar y monitorear el tratamiento simultáneamente. De igual manera, el estudio de la citotoxicidad debe ser abordado para lograr un andamio altamente efectivo en la liberación controlada de fármacos.

Palabras clave: Nanopartículas; nanotecnología; nanomateriales; puntos cuánticos; nanopartículas de carbono; liberación controlada.

SUMMARY

Carbon Quantum Dots: A nanotechnological approach to drug encapsulation

Introduction: At the forefront of the emerging trend in carbon-based nanomaterials, Carbon Quantum Dots (CQDs) are positioned as a promising alternative for a wide range of biomedical applications. These carbon-derived biomaterials, with dimensions below 10 nm, are distinguished by their fluorescent emission. **Objective:** This article analyzes the most relevant concepts surrounding Carbon Quantum Dots as drug carriers for therapeutic applications. **Methods:** The literature search included the following specialized databases: PubMed/Medline, Cochrane Library, SciELO, and the search engine Google

Scholar. Controlled vocabulary (MeSH and DeCS) was employed, using the terms defined for this review: “Nanoparticles,” “Nanotechnology,” “Nanomaterials,” “Quantum Dots,” “Carbon nanoparticles,” and “Drug delivery systems.” **Findings:** Due to their small size and fluorescent properties, CQDs can be synthesized rapidly through various cost-effective and straightforward methods, making them a viable alternative to other fluorescent nanomaterials. Their use in nanomedicine encompasses support technologies or scaffolds for drug functionalization or encapsulation. These nanoparticles can mimic or modulate biological processes, offering solutions to longstanding challenges related to solubility, bioavailability, immunocompatibility, and cytotoxicity of many conventional drugs. **Conclusion:** The application of Carbon Quantum Dots in future innovations within nanomedicine could lead to the development of multifunctional platforms capable of diagnosing, treating, and monitoring therapy simultaneously. Likewise, the issue of cytotoxicity must be addressed in depth to achieve highly effective scaffolds for controlled drug release.

Keywords: Nanoparticles; nanotechnology; nanomaterials; quantum dots; carbon nanoparticles; drug delivery systems.

RESUMO

Pontos quânticos de carbono: uma abordagem nanotecnológica para encapsulamento de medicamentos

Introdução: Na vanguarda da nova tendência das nanopartículas emergentes na família dos nanomateriais carbônicos, os “Pontos Quânticos de Carbono” são projetados como uma alternativa para múltiplas aplicações biomédicas. Esses biomateriais à base de carbono com dimensões inferiores a 10 nm são caracterizados por sua emissão fluorescente. **Objetivo:** No presente artigo são analisados os conceitos mais relevantes das nanopartículas como “Pontos Quânticos de Carbono” como portadores de medicamentos para aplicações terapêuticas. **Métodos:** A pesquisa incluiu as seguintes bases de dados especializadas PubMed/Medline, Cochrane Library, SciELO e o motor de pesquisa Google Scholar. Para a pesquisa foi utilizado um vocabulário controlado (MeSH e DeCS), empregando os termos definidos para esta revisão como “Nanopartículas”, “Nanotecnologia”, “Nanomateriais”, “Pontos Quânticos”, “Nanopartículas de carbono”, “Sistemas de distribuição de medicamentos”. **Hallazgos:** Os pontos quânticos de carbono, como pequenas nanopartículas fluorescentes, podem ser sintetizados rapidamente em diversas rotas econômicas e sencillas, o que os converte em uma alternativa viável diante de outros nanomateriais fluorescentes. O uso dessas nanopartículas na nanomedicina abandonou o emprego de tecnologias de suporte ou plantas por meio da funcionalização ou encapsulamento de medicamentos. Estas nanopartículas podem imitar ou modificar processos biológicos, permitindo abordar problemas associados à solubilidade, biodisponibilidade, imunocompatibilidade e citotoxicidade de muitos dos medicamentos de uso tradicional. **Conclusão:** A aplicação dos “Pontos Quânticos de Carbono” em futuras inovações no campo da nanomedicina poderá gerar entidades multifuncionais capazes de diagnosticar, tratar e monitorar o tratamento simultaneamente. Da mesma forma, o estudo de citotoxicidade deve ser abordado para lograr um estudo altamente eficaz na liberação controlada de medicamentos.

Palavras-chave: Nanopartículas; nanotecnologia; nanomateriais; pontos cuánticos; nanopartículas de carbono; libertação controlada.

1. INTRODUCCION

En los últimos tiempos, la nanotecnología ha surgido como un campo innovador con un alto potencial de avances en múltiples dominios científicos [1]. El concepto de nanotecnología se introdujo por primera vez en 1959 cuando el físico Richard Feynman realizó una presentación sobre cómo hacer cosas a nivel atómico y molecular. A nivel atómico, las propiedades de un

elemento están determinadas por su configuración electrónica, pero los fenómenos cuánticos emergen cuando la materia se reduce a dimensiones nanométricas [2, 3].

Al reducir un material a esta escala, sus propiedades fisicoquímicas pueden modificarse significativamente debido al efecto de confinamiento cuántico. Este efecto de confinamiento crea una cuantización de la energía en niveles discretos en las bandas de conducción y valencia, por lo que el material puede considerarse implícitamente un “átomo virtual” [4, 5]. Actualmente, este efecto producido en diversos sistemas es llamado “Quantum Dots”, definidos como diminutas nanopartículas semiconductoras de tan solo unos pocos nanómetros de tamaño (2-10 nm) que presentan propiedades electrónicas y ópticas únicas. Estos materiales generalmente consisten en carbono, silicio, seleniuro de cadmio, sulfuro de cadmio o arseniuro de indio y emiten fluorescencia cuando se excitan con una fuente de luz [6].

En el auge de los alótropos de carbono nanoestructurados como el fullereno, los nanotubos de carbono y el grafeno se ha allanado el camino para una nueva era en la ciencia de los materiales [7]. El carbono por estar omnipresente en la naturaleza como una sustancia de color oscuro con baja solubilidad en agua y fluorescencia débil, ha atraído un gran interés gracias a su facilidad de funcionalización superficial, métodos de síntesis fáciles, biodegradabilidad y nula toxicidad [8, 9].

Al reducir este compuesto a escala nanométrica se crean los “Puntos cuánticos de carbono” (CQDs) o puntos cuánticos basados en carbono, también conocidos como nanoluces de carbono, esta es una nueva clase de nanomateriales de carbono cuasiesféricos y fotoluminiscentes [10-12]. Los CQDs debido a su tamaño poseen características magnéticas, eléctricas, ópticas y físicas que los proyecta hacer un nanomaterial altamente versátil para todas las industrias [13, 14].

A nivel de la biomedicina específicamente en la biofarmacología, estas nanopartículas pueden utilizarse como posibles nanotransportadores de bioactivos y fármacos. La implementación de estos nuevos nanosistemas de administración de fármacos ha demostrado ser prometedora al mejorar el índice terapéutico del fármaco y la eficacia en el objetivo diana. La eficacia de los nanosistemas basados en CQDs radica en su pequeño tamaño y capacidad de penetración en la membrana celular, esta ventaja reduce los efectos adversos ocasionados por los sistemas de administración convencionales. Este artículo tiene como objetivo analizar los conceptos más relevantes de las nanopartículas tipo “Puntos cuánticos de carbono” como portadores de fármacos para aplicaciones terapéuticas.

2. MÉTODOS

Esta revisión no utilizó inteligencia artificial (IA). La búsqueda incluyó las siguientes bases de datos especializadas Pubmed/ Medline, Scielo y el motor de búsqueda Google Scholar. Para la búsqueda se utilizó vocabulario controlado (MeSH y DeCS), definidos para esta revisión como “Nanoparticles”, “Nanotechnology” “Nanomaterials”, “Quantum Dots” “Carbon nanoparticles” “Drug delivery systems”. Se evitó homónimos y variaciones ortográficas. Para la estrategia aplicada a Google Scholar se planteó un límite artificial de 70 resultados no replicables. Como estrategia complementaria se utilizó el escaneo de referencias de citas de artículos relacionados al tema. Se utilizó el operador booleano – AND–, cuando la primera opción no estaba disponible se utilizó el operador booleano – OR. Solo se buscaron artículos en inglés y español. El filtro de temporalidad se registró 2019 al 2024, este filtro permitió encontrar la literatura actualizada.

Los criterios de inclusión aplicados fueron de acuerdo con el rigor metodológico de la literatura y con un tipo de fuente primaria y secundaria. Según el formato del material se incluyeron artículos originales, revisiones de literatura, comunicaciones cortas, actas de congreso, informes técnicos, cartas al editor. Los artículos seleccionados para la fase de tamizado cumplieron con los siguientes criterios de elegibilidad: a) el artículo que reportara resultados investigativos relacionados con “Puntos cuánticos de carbono”, b) artículos que mencionen “Quantum Dots” y “fármacos”. La extracción de los resultados ($n=14$) fue realizada por el autor principal.

3. HALLAZGOS Y SINTESIS

3.1. “Carbon quantum dots” (CQDs)

Los puntos cuánticos (QDs) son cristales coloidales semiconductores, compuestos por elementos de los grupos II-VI o III-V, constituidos por cientos o miles de átomos ordenados en una estructura cristalina de forma habitualmente esférica y de dimensiones inferiores a 10 nm [15]. En la década de 1980, los puntos cuánticos fueron observados experimentalmente por Alexey Ekimov, lo que lo hizo merecedor del Premio Nobel 2023, posteriormente fue Reed *et al.* (1988) quienes acuñaron el término “puntos cuánticos” para demostrar nanoestructuras fotoluminiscentes con estados de energía completamente cuantificados [16].

Una de las características de los QDs es que los electrones están obligados a mantenerse confinados entre las tres dimensiones, lo que genera diversos fenómenos cuánticos y lo ubica en cero dimensiones. Para que dicho proceso tenga lugar, el tamaño de los puntos cuánticos ha de ser similar al radio del excitón de Bohr. Los QDs convencionales suelen constar de núcleos de metales pesados y carcasas semiconductoras de banda ancha, lo que genera problemas de toxicidad [17].

En comparación con los puntos cuánticos (QDs) tradicionales, los CQDs ofrecen una gama más amplia de soluciones y menor toxicidad, lo que los hace preferibles para aplicaciones biomédicas [18-20]. Estas nanopartículas hemisféricas, compuestas de carbono amorfo o cristalino con dimensiones de 1 a 10 nm, son objeto de una amplia investigación debido a sus propiedades ventajosas: alta luminiscencia, estabilidad química, solubilidad en agua, bajo fotoblanqueo, biocompatibilidad, bajo costo y baja toxicidad.

Fue en el 2004 cuando Xu *et al.* descubrieron accidentalmente los CQDs al trabajar con nanotubos de pared simple. Sun y sus colaboradores demostraron una ruta sintética y los denominaron “Puntos cuánticos de carbono” [21]. Los CQDs tienen un parámetro de red cristalina aproximadamente de 0,34 nm lo que corresponde a una separación entre capas de grafito (002) [19]. Tanto los QDs como los CQDs tienen la propiedad de emitir fluorescencia, esto se debe al control del tamaño de nanopartícula que permite ajustar las longitudes de onda (correspondiente al color) de los fotones emitidos por los electrones.

Este ajuste produce diversas longitudes de ondas, es decir, mientras más grandes sean las nanopartículas, producirán longitudes de ondas más largas y frecuencia más bajas y así a la inversa. Esto indica que los CQDs más grandes emiten luz cercana al rojo y las más pequeñas emiten luz azul. Este efecto se debe al tamaño de banda prohibida, dado que la frecuencia de luz emitida es proporcional a la energía. Los puntos más grandes tienen niveles de energía más espaciados, por lo que emiten frecuencias más bajas y, por lo tanto, longitudes de onda más largas [22, 23].

Los CQDs poseen una estructura “núcleo-capa” con un núcleo de carbono (2-3 nm con un espaciado reticular de 0,2 nm) y una capa autopasivada (que comprende grupos funcionales). El núcleo (estados intrínsecos), según los estudios, puede ser cristalino grafitico (sp^2) o amorfo (sp^2/sp^3 mixto). Dependiendo de si el carbono sp^2 está presente, las arquitecturas de núcleo-capa de los puntos cuánticos de carbono (CQDs) pueden tener una estructura cristalina amorfa o grafitica [24].

La naturaleza soluble en agua de los CQDs se atribuye a la presencia de grupos funcionales que contiene oxígeno, a saber, carboxilo (-COOH) e hidroxilo (-OH) en su superficie. Los grupos funcionales de los CQDs también contribuyen a su solubilidad, formando coloides estables en disolventes acuosos u orgánicos polares, lo cual resulta ventajoso frente a los puntos cuánticos de grafeno (GQDs), que presentan una baja solubilidad en disolventes comunes [25, 26].

3.2. Propiedades de los “Puntos cuánticos de carbono”

Entre las propiedades de CQDs se encuentran la baja toxicidad, superficie hidrófila, fluorescencia sin parpadeo, resistencia al fotoblanqueo, fácil pasivación, estabilidad química y buena compatibilidad celular. Estas características son fundamentales para convertirlos en nanomateriales altamente prometedores para aplicaciones biomédicas, ópticas y terapéuticas, ya que permiten su integración en sistemas biológicos sin generar efectos adversos significativos. Además, su superficie funcionalizable facilita la conjugación con biomoléculas específicas, potenciando su selectividad en procesos de diagnóstico y tratamiento. A continuación, se desglosarán las propiedades más importantes de los CQDs:

3.2.1. Absorción de luz

Los picos de absorción UV- visibles podría revelar la información de los estados de emisión y excitación del material. El pico de absorción en el rango de 280 a 350 nm se atribuye a transiciones electrónicas de enlaces C–O o C=O a orbitales π^* . Está claro que los electrones pueden moverse a los enlaces C=N desde la órbita π . La transición electrónica de los enlaces C–O o C=O al orbital π^* es responsable del espectro de absorción en el rango de 280 a 350 nm [27].

Shaabir *et al.* (2023) [28] mencionan que los grupos funcionales como C=O y C–O inducen transiciones electrónicas $n \rightarrow \pi^*$ y $\pi \rightarrow \pi^*$, responsables de los picos de absorción UV-visible, además, la oxidación de los precursores y la composición química determinan la naturaleza de los grupos funcionales, lo que a su vez modula el comportamiento óptico de los CQDs. Estos hallazgos sugieren que la superficie funcionalizada de los CQDs desempeña un papel clave en la modulación de sus propiedades ópticas.

3.2.2. Fluorescencia

Los fenómenos de fluorescencia se producen principalmente por dos mecanismos: (a) defectos superficiales, pasivación/funcionalización superficial, estado del núcleo de carbono, efecto del tamaño cuántico y (b) brechas de banda de dominios π -conjugados (hibridados sp^2) que se asemejan a moléculas aromáticas que incorporan ciertas brechas de banda de energía con respecto a la absorción y emisión [29].

La energía de banda prohibida de un CQDs es la diferencia en el nivel de energía entre el estado de energía excitado del punto y su estado de reposo. El punto cuántico puede absorber luz fluorescente a la frecuencia de su banda prohibida para excitarse o emitir la misma frecuencia de luz para volver a su estado de reposo. El tamaño de un CQDs es inversamente proporcional al nivel de energía de la banda prohibida y, por lo tanto, altera la frecuencia de la luz emitida y tiene un efecto en el color [28].

3.2.3. Transferencia de electrones fotoinducida

En soluciones, los CQDs serán aceptores de electrones o donantes de electrones que pueden extinguirse eficazmente, lo que indica que los CQDs fotoinducidos también son mayores donantes y aceptores de electrones [20]. La transferencia de electrones en CQDs está directamente relacionada con su estructura electrónica y la naturaleza de sus orbitales superficiales.

En estas soluciones, los CQDs excitados pueden donar electrones a especies oxidantes o aceptar electrones de moléculas reductoras, lo que los convierte en plataformas versátiles para sensores electroquímicos y photocatalizadores [11]. Esta capacidad de transferencia electrónica también permite modular la fluorescencia de los CQDs en presencia de biomoléculas, lo que los convierte en herramientas sensibles para bioimagen y diagnóstico [12].

3.2.4. Efecto de confinamiento cuántico

El efecto de confinamiento por tamaño se produce por el confinamiento espacial de los iones excitados en una dimensión adicional dentro de un material. La energía de emisión depende del radio de la partícula, de modo que a medida que esta se hace más pequeña, tanto el espectro de excitación como el de emisión se desplazan a longitudes de onda más cortas [30].

En una distribución de CQDs con tamaños variables, diferentes subconjuntos se excitan favorablemente a medida que varía la longitud de onda de excitación. A medida que se excitan CQDs según el tamaño, el espectro de emisión se desplaza con la longitud de onda [8]. El confinamiento espacial en CQDs genera una separación discreta de los niveles de energía, lo que modifica directamente sus propiedades ópticas. Esta relación inversa entre el tamaño y la longitud de onda emitida permite ajustar la fluorescencia de los CQDs mediante control sintético, lo que resulta clave para aplicaciones en bioimagen y sensores ópticos [14].

3.3. Síntesis, purificación y caracterización de “Puntos cuánticos de carbono”

En el enfoque descendente se utilizan métodos físicos o químicos para destruir o dispersar la fuente de carbono a granel en CQDs de tamaño pequeño. Este método generalmente emplea estructuras de carbono con hibridación sp^2 que no presentan brechas de energía ni brechas de banda efectivas como materiales precursores [31]. Entre los enfoques descendentes se encuentran la ablación por láser, oxidación acida, ablación química, carbonización electroquímica, descarga de arco y síntesis ultrasónica (Tabla 1) [32, 33].

Tabla 1. Síntesis con enfoque descendente

Síntesis	Descripción
Ablación por laser	El enfoque ideal es utilizar un pulso láser con una energía muy alta para irradiar la superficie de las moléculas objetivo y transferirla al estado termodinámico donde se crean altas temperaturas y presiones. Esto evapora rápidamente las moléculas objetivo y las transfiere a un estado de plasma donde cristalizan para formar nanopartículas.
Oxidación acida	Se trata de exfoliar y desintegrar carbono a granel en nanopartículas mientras se insertan simultáneamente grupos funcionales hidrófilos en la superficie, como grupos hidroxilo o carboxilo.
Ablación química	La ablación química es un proceso en el que pequeñas moléculas orgánicas se carbonizan en materiales nanocarbonosos con ácidos oxidantes fuertes, que luego se convierten en pequeñas láminas mediante una oxidación controlada.
Carbonización electroquímica	Los CQDs se producen utilizando una configuración de tres electrodos con un electrodo de trabajo (WE) como electrodo de grafito, un contraelectrodo (CE) como

	una lámina de platino o alambre de Pt y un electrodo de referencia (RE) como un electrodo de Ag/AgCl.
Descarga de arco	Este proceso utiliza plasma de gas generado en un reactor sellado dentro de un electrodo anódico para reorganizar las moléculas de carbono a medida que se rompen en segmentos más pequeños a partir de fuentes de carbono a granel.
Síntesis Ultrasónica	El proceso de preparación de CQDs es fácil y económico con el uso de tecnología ultrasónica. Crea ondas de alta y baja presión alternas que causan que pequeñas burbujas en el líquido evolucionen y revienten.

El enfoque ascendente se realiza mediante reacciones térmicas o químicas, los CQDs se ensamblan a partir de precursores de carbono más pequeños en enfoques ascendentes [34, 35]. Entre los enfoques ascendentes se desglosan en la Tabla 2.

Tabla 2. Síntesis de CQD con enfoque ascendente

Método hidrotermal	Para hacer el precursor de la reacción, se suspenden compuestos orgánicos de pequeño tamaño en agua o un disolvente orgánico. Luego, se transfiere al autoclave de acero inoxidable revestido con teflón, que se utiliza comúnmente en el laboratorio para el método hidrotermal. A una temperatura relativamente alta, las moléculas orgánicas se fusionaron para producir núcleos de siembra de carbono, que crecen en CQDs con tamaños inferiores a 10 nm.
Combustión	Este proceso utiliza tratamientos con ácido oxidativo para ajustar las características de fluorescencia, mejorar la solubilidad en agua y agregar pequeños recursos de carbono en CQDs.
Pilorosis	La técnica de pirólisis es una descomposición térmica de un precursor, típicamente por encima de 430 °C, para crear partículas coloidales a escala nanométrica (1). El proceso implica carbonizar y priorizar pequeñas moléculas orgánicas a una temperatura específica para producir puntos de carbono luminosos.
Solvotermal	El método solvotérmico se desarrolló con base en el método hidrotérmico. Se diferencia del método hidrotérmico en que los solventes utilizados son orgánicos en lugar de agua. Bajo fase líquida o condiciones supercríticas, los reactantes dispersos en la solución se vuelven más activos y los productos se forman lentamente.
Síntesis asistida por microondas	Este método utiliza radiación electromagnética en el rango de microondas (con longitudes de onda entre 1 mm y 1 m) para proporcionar un calentamiento volumétrico uniforme directamente al medio de reacción. El rápido calentamiento interno rompe los enlaces precursores y acelera la carbonización, produciendo CQDs con propiedades ópticas deseables en cuestión de minutos.

La separación y purificación del CQDs es fundamental para el control de calidad de los sistemas biológicos. Los métodos de purificación incluyen la electroforesis, la centrifugación, la diálisis y la cromatografía en columna [36]. La caracterización para los CQDs se puede realizar a través de Difracción de Rayos X (DRX) que proporciona la información de las dimensiones de la celda unitaria y el espaciado de red presente en los núcleos de carbono cristalino [21].

La resonancia magnética nuclear (RMN), la espectroscopia Raman, la microscopía electrónica de transmisión (TEM) y de barrido (SEM), la espectroscopia de fotoelectrones de rayos X (XPS), el análisis elemental (EA), el infrarrojo por transformada de Fourier (FT-IR) y microscopía de Fuerza atómica (AFM) son métodos adicionales (Tabla 3). El análisis de absorción de

nitrógeno se utiliza para determinar el área superficial de las nanopartículas de carbono. Utilizando la potencial zeta, se verifica la existencia de grupos funcionales en la capa externa [37].

Tabla 3. Métodos para caracterización de CQDs [37]

Método	Resonancia magnética nuclear (RMN)	Definición
Microscopía electrónica de transmisión (TEM)	Espectroscopía Raman	Basado en el fenómeno RMN de núcleos con espín no cero en un campo magnético, probando transiciones con ondas de radio; analiza coeficientes de difusión vía ecuación de Stokes-Einstein, estudia interacciones ligando-superficie y difusión de partículas.
		Función
		Analiza la formación y arquitectura de NPs

Microscopía de fuerza atómica (AFM)	Infrarrojo por transformada de Fourier (FT-IR)	Espectroscopía de fotoelectrones de rayos X (XPS)	Microscopía electrónica de barrido (SEM)
Usa un cantilever con una sonda afilada para escanear la superficie, midiendo la fuerza para mapear la topografía con resolución nanométrica, a menudo en modo tapping para NPs, creando imágenes 3D.	Mide la absorción de radiación infrarroja media ($4000\text{--}400\text{ cm}^{-1}$) para identificar transiciones vibracionales, proporcionando información sobre estructuras moleculares, fuerza de enlaces y grupos funcionales por vía de absorción de luz infrarroja.	Irradia la muestra con rayos X, analiza fotoelectrones emitidos de energía cinética para determinar estado elemental/químico.	Escanea por medio de un haz de electrones enfocado a través de la muestra, detectando electrones secundarios/retrodispersados para generar una imagen superficial de alta resolución.
Topografía superficial, tamaño, forma y morfología de nanopartículas en modo 3D; grado de cobertura superficial, dispersión en matrices, precisión en dimensiones laterales.	Composición molecular, grupos funcionales, unión química e interacciones de ligandos en superficies de nanopartículas.	Composición elemental, estado químico, estado electrónico de átomos superficiales, química superficial de las nanopartículas.	Morfología superficial, tamaño, forma, dispersión en células/matrizes/soportes, precisión en dimensiones laterales, composición elemental, información topográfica, arreglo espacial.
No destructivo, proporciona visualización 3D, alta resolución espacial (escala nanométrica), alta precisión en dimensiones laterales, examen rápido, no requiere modificación o coating superficial, resolución similar a SEM/TEM a menor costo y espacio; caracteriza altura de NPs.	No destructivo, proporciona información química y electrónica superficial detallada sobre grupos funcionales superficiales e interacciones moleculares.	Proporciona información química y electrónica superficial detallada, no destructivo para análisis superficial.	Alta resolución (hasta 1 nm), preparación de muestra rápida/fácil.

Potencial zeta	Mide la movilidad electrofónica en campo eléctrico para determinar la carga superficial.	Carga superficial y estabilidad de dispersiones coloidales de nanopartículas.	Proporciona insight en estado de aglomeración y carga superficial, útil para análisis de estabilidad; indica estabilidad coloidal, no destructivo.
----------------	--	---	--

La distribución de tamaño de los CQDs se analiza estadísticamente mediante TEM y AFM. La composición básica del CQDs consiste en elementos C, H, O y N y se confirma mediante XPS. Los grupos funcionales presentes en los CQDs son COC, COOH, C-OH, CH y CC, confirmados por FTIR. Se utiliza espectroscopia UV-vis y espectroscopia de fluorescencia para caracterizar las propiedades ópticas de los CQDs [36].

3.4. Aplicaciones de los “Puntos cuánticos de carbono”

3.4.1. Bioimagen y biosensores

La aplicación de puntos cuánticos de carbono (CQDs) en bioimagen ha cobrado relevancia por su alta biocompatibilidad, baja toxicidad y capacidad de emisión fluorescente multicolor. Estudios recientes han demostrado que los CQDs pueden diseñarse para emitir en rangos específicos del espectro, lo que permite su uso en técnicas de imagenología de tejidos profundos y seguimiento celular en tiempo real.

Das *et al.* (2024) [38] destacan el potencial de los CQDs como agentes de contraste en bioimagen, subrayando su versatilidad para combinar fluorescencia con funcionalización molecular dirigida. Por su parte, Lesani *et al.* (2020) [39] desarrollaron una sonda basada en CQDs con emisión dual para imagenología mediante excitación bifotónica, logrando una visualización eficiente en tejidos con alta densidad óptica.

La versatilidad de los puntos cuánticos de carbono se ha ampliado mediante su funcionalización con elementos magnéticos y biológicos, como lo demuestra el estudio de Yao *et al.* (2017) [40], quienes desarrollaron CQDs magnetofluorescentes. Estos nanomateriales fueron dopados con iones metálicos (Gd^{3+} , Mn^{2+} y Eu^{3+}), lo que les confirió propiedades contrastantes para imagenología por resonancia magnética (MRI), además de una intensa fluorescencia para bioimagen óptica. Además, al incorporar doxorubicina como fármaco modelo, los CQDs mostraron una citotoxicidad significativamente superior frente a células tumorales en comparación con el fármaco libre, sin evidenciar toxicidad en modelos *in vivo*.

Aunque la bioimagen y los biosensores comparten el uso de puntos cuánticos de carbono (CQDs) por sus propiedades ópticas excepcionales, sus aplicaciones biomédicas se distinguen por su propósito y enfoque. Mientras que la bioimagen permite visualizar estructuras biológicas en tiempo real, los biosensores están diseñados para detectar y cuantificar biomoléculas específicas mediante cambios en la señal óptica del nanomaterial.

Esta capacidad de respuesta ante estímulos moleculares convierte a los CQDs en transductores altamente sensibles para el monitoreo clínico. Un ejemplo destacado es el estudio de Vyas *et al.* (2024) [41], donde se desarrollaron biosensores de película delgada, basados en

CQDs conjugados con enzimas para la detección específica de contaminantes organofosforados como etil paraoxón y metil paraoxón. El sistema mostró alta sensibilidad, selectividad y estabilidad en condiciones ambientales reales, lo que demuestra el potencial de los CQDs en aplicaciones de diagnóstico molecular y control toxicológico.

3.4.2. Fototérmica

La terapia fototérmica (PTT) es una estrategia terapéutica mínimamente invasiva que utiliza nanomateriales capaces de convertir la energía lumínica, generalmente en el espectro del infrarrojo cercano (NIR), en calor localizado. Este aumento de temperatura inducido por irradiación láser induce la destrucción térmica de células patológicas, como las tumorales, sin afectar significativamente los tejidos sanos circundantes.

La integración de propiedades ópticas y terapéuticas en nanomateriales ha impulsado el desarrollo de plataformas teragnóstica para oncología. En este contexto, Bao *et al.* (2018) [42] diseñaron puntos cuánticos de carbono emisores en el infrarrojo cercano (NIR-CDs), dopados con azufre y nitrógeno, capaces de combinar bioimagen y terapia fototérmica de alta eficiencia. Tras su administración intravenosa en modelos, los NIR-CDs se acumularon pasivamente en tejido tumoral sin necesidad de ligandos específicos, lo que permitió una visualización precisa mediante fluorescencia y fotoacústica.

De igual manera, Zhao *et al.* (2023) [43] lograron sintetizar CQDs con estados excitados localizados y de transferencia de carga, lo que les confirió una doble capacidad de emisión en NIR-I/NIR-II y una alta eficiencia de absorción multifotonica. Estos CQDs mostraron una conversión fototérmica superior al 60%, lo que permitió realizar imagenología profunda con resolución subcelular y ablación tumoral localizada tras irradiación láser. La combinación de diagnóstico y tratamiento en una sola plataforma nanométrica ha impulsado el desarrollo de sistemas teragnóstica basados en puntos cuánticos de carbono emisores en el infrarrojo cercano (NIR-CDs) para tratamientos localizados.

3.4.3. Fotodinámica

La terapia fotodinámica (PDT) es una modalidad terapéutica no invasiva que combina un agente fotosensibilizador, luz de longitud de onda específica y oxígeno molecular para generar especies reactivas de oxígeno (ROS) capaces de inducir daño celular selectivo. Al ser activados por irradiación lumínica, los fotosensibilizadores producen ROS como el oxígeno singlete, que desencadena procesos de apoptosis, necrosis o autofagia en células patológicas, sin afectar significativamente el tejido sano circundante.

La optimización de sistemas fotodinámicos para el tratamiento de tumores ha llevado al desarrollo de nanocomuestos activables por luz. En este contexto, Negi *et al.* (2024) [44] diseñaron puntos cuánticos de carbono sensibles a dos fotones, incorporados en estructuras metal-orgánicas nanoestructuradas (NMOFs), funcionalizadas con ácido fólico para direccionamiento específico hacia células tumorales que sobreexpresan el receptor de folato. Bajo irradiación con láser de 980 nm, el sistema demostró una generación eficiente de especies reactivas de oxígeno (ROS), incluyendo oxígeno singlete, lo que permitió una inhibición celular del 73% en líneas cancerosas. La fluorescencia cuántica del sistema alcanzó un rendimiento del 13%, lo que además habilita su uso en imagenología simultánea.

La terapia fotodinámica también ha demostrado ser eficaz en el tratamiento de infecciones bacterianas resistentes, especialmente cuando se emplean nanocomuestos funcionalizados con capacidad fotosensibilizadora. En el estudio de Marković *et al.* (2019) [45], se desarrollaron nanocomuestos de puntos cuánticos de carbono (CQDs) encapsulados en polidimetilsiloxano (PDMS), diseñados para generar especies reactivas de oxígeno (ROS) bajo irradiación con luz

azul (470 nm). Estos CQDs mostraron una potente actividad antibacteriana frente a cepas resistentes como *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* y *Klebsiella pneumoniae*, logrando una erradicación significativa sin inducir citotoxicidad en células NIH/3T3.

3.5. "Puntos cuánticos de carbono" para la encapsulación de fármacos

La evolución de los materiales nanocomuestos ha mejorado significativamente la capacidad de administración de fármacos gracias a los diversos vehículos de administración. Estos sistemas presentan características únicas que facilitan la administración dirigida de fármacos a través de diversas barreras fisiológicas. La integración de mecanismos de administración inteligentes con enfoques terapéuticos convencionales ha mejorado la eficacia de los fármacos y reducido la toxicidad sistémica.

La búsqueda de sistemas no invasivos para la administración de péptidos terapéuticos ha impulsado el desarrollo de formulaciones basadas en nanomateriales funcionalizados. En este contexto, Çamlıklı *et al.* (2022) [46] diseñaron una formulación oral de insulina utilizando puntos cuánticos de carbono compuestos (CQDs), dopados con nitrógeno y recubiertos con polímeros biocompatibles como PEG 3350 y metilcelulosa. Esta arquitectura permitió proteger la insulina frente a la degradación gastrointestinal y facilitar su absorción sistémica, logrando una reducción significativa de la glucemia en modelos animales diabéticos y demostrando efectos antihiperglucémicos independientes, atribuibles a su capacidad para modular la actividad mitocondrial y estimular la glucólisis celular.

Los CQDs, gracias a su química de superficie ajustable, permiten modificaciones precisas para mejorar la carga del fármaco y la liberación controlada, mientras que su pequeño tamaño facilita la penetración profunda en los tejidos. La integración de CQDs en matrices de hidrogel amplía aún más sus aplicaciones biomédicas, en particular en el cuidado de heridas y la ingeniería de tejidos. Al incorporar CQDs, estos hidrogeles obtienen capacidades mejoradas de administración de fármacos y propiedades antibacterianas, a la vez que mantienen la biocompatibilidad, lo que facilita la monitorización no invasiva del fármaco [37].

Además de su aplicación en hidrogeles, los CQDs han sido explorados en otros sistemas de liberación controlada. En el estudio de Samimi *et al.* (2021) [47], se desarrolló una formulación que combina CQDs con ácido quirúrgico para facilitar la entrega dirigida de gemcitabina a células de cáncer de mama, logrando un prometedor nanotransporte para dicho fármaco. Por su parte, la resistencia bacteriana y la formación de biopelículas representan desafíos críticos en el tratamiento de infecciones persistentes. En este contexto, Wang *et al.* (2019) [48] desarrollaron puntos cuánticos de carbono dopados con nitrógeno (N-CQDs) como una estrategia antimicrobiana innovadora. Estos nanomateriales fueron sintetizados a partir de sales biscuaterarias, lo que les confirió una carga positiva capaz de interactuar electrostáticamente con las membranas bacterianas, logrando una actividad antimicrobiana del 99% frente a cepas resistentes como *Staphylococcus aureus* resistente a meticilina (MRSA) y *Escherichia coli* resistente a ampicilina, superando incluso a antibióticos clínicos como vancomicina y gentamicina.

Los ensayos *in vitro* evidenciaron una mejora significativa en la citotoxicidad frente a células tumorales, en comparación con el fármaco libre, lo que sugiere una mayor eficacia terapéutica y menor toxicidad sistémica. Este enfoque representa un avance relevante en la nanotecnología aplicada a la oncología, al integrar funcionalización bioactiva y liberación controlada en un solo sistema nanométrico [47].

Al igual que otros nanomateriales, la administración de fármacos basada en CQDs implica la unión de fármacos a CQDs o adsorción para una administración en un sitio específico con efectos secundarios mínimos. El enlace entre CQDs y el fármaco se escinde en el complejo

CQDs-fármaco en un entorno ácido del sitio enfermo u otros factores estimulantes, permitiendo así una liberación controlada del fármaco en sitios específicos [28].

En el caso de los CQDs dopados con material electromagnético o inducido magnéticamente, el fármaco se administrará a la ubicación objetivo con la ayuda del campo magnético o electromagnético externo mediante el portador de fármaco controlado [20]. Los CQDs pueden volverse magnéticos para su uso en resonancia magnética (RM), a la vez que ofrecen la ventaja de la administración de fármacos y la obtención de imágenes de fluorescencia. La RM combinada con la fluorescencia proporciona una penetración tisular superior, una resolución espacial superior y un examen microscópico del tejido mediante imágenes de fluorescencia [36].

Los CQDs son un buen sustituto de las nanopartículas de oro (AuNP), y la funcionalización variada podría llevar a mejores posibilidades de conjugación de fármacos en combinación con agentes diana, lo que resulta en un aumento de la eficiencia de administración de fármaco. La modificación controlable de la superficie para variar funciones, el tamaño pequeño, el bajo coste, la biocompatibilidad y la casi ausencia de efectos secundarios hacen de los CQDs una elección fácil como diana farmacológica [49].

La integración de nanomateriales funcionalizados con componentes biológicos ha abierto nuevas posibilidades en la terapia dirigida contra el cáncer. Un ejemplo destacado es el estudio de Tiwari *et al.* (2023) [50], quienes desarrollaron un sistema híbrido de liberación controlada que combina puntos cuánticos de carbono cargados con dacarbazine y recubiertos con exosomas derivados de células de cáncer de mama. Esta formulación, denominada Ex-DC@CQDs, demostró una alta especificidad tumoral, mejor penetración celular y una liberación sostenida del fármaco, lo que se tradujo en una eficacia antitumoral significativamente superior en modelos *in vivo*, con menor toxicidad sistémica en comparación con la dacarbazine libre.

4. CONSIDERACIONES FINALES

Los CQDs son ejemplos de nanomateriales artificiales fabricados mediante procedimientos mecánicos y precisos. Debido a sus efectos cuánticos, elevada relación superficie-volumen y la emisión de luz visible, pueden ser utilizados como nanotransportadores y sondas moleculares para el seguimiento y la monitorización simultáneos de la administración de fármacos y la eficacia terapéutica. Muchas proteínas y biomoléculas comunes existen en una escala de tamaño similar, y estas pequeñas escalas de longitud permiten que los materiales inorgánicos interactúen estrechamente con entidades biológicas a nivel molecular.

El tamaño nanométrico les permite una mayor sensibilidad y una dosis efectiva menor, sin sacrificar la funcionalidad. Esta relación superficie-volumen, sumada a la amplia gama de productos químicos disponibles, facilita la modificación de la superficie para mejorar la biocompatibilidad, la solubilidad y la reactividad. Los CQDs se preparan mediante la funcionalización superficial de nanopartículas de carbono con moléculas orgánicas y poliméricas.

La mayoría de los métodos de preparación se basan en la carbonización de precursores que contienen carbono. La carbonización de diversos zumos de frutas, cáscaras de sandía o pomelo, numerosos alimentos, hierbas y hojas de plantas ha permitido la obtención de CQDs. La encapsulación de fármacos con CQDs puede ser una ventana hacia nuevas tecnologías que permitan entender como es el funcionamiento de los bioactivos con el elemento diana.

CONFLICTO DE INTERÉS

La autora declara que no tiene ningún conflicto de interés, financiero o de otro tipo, que pudieran influir en los resultados de esta revisión.

REFERENCIAS

1. A. Haleem, M. Javaid, R.P. Singh, S. Rab & R. Suman. Applications of nanotechnology in medical field: a brief review. *Global Health Journal*, **7**(2), 70–77 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.glohj.2023.02.008>
2. R.P. Feynman. There's plenty of room at the bottom. *Resonance*, **16**(9), 890–898 (2011). <https://doi.org/10.1007/s12045-011-0109-x>
3. M.C. Roco. Nanotechnology: convergence with modern biology and medicine. *Current Opinion in Biotechnology*, **14**(3), 337–346 (2003). [https://doi.org/10.1016/S0958-1669\(03\)00068-5](https://doi.org/10.1016/S0958-1669(03)00068-5)
4. Z. Xie, X. Li, R. Li, S. Lu, W. Zheng, D. Tu, Y. Feng & X. Chen. *In situ* confined growth of ultrasmall perovskite quantum dots in metal–organic frameworks and their quantum confinement effect. *Nanoscale*, **12**(32), 17113–17120 (2020). <https://doi.org/10.1039/d0nr04741d>
5. B. Rooj & U. Mandal. A review on characterization of carbon quantum dots. *Vietnam Journal of Chemistry*, **61**(6), 693–718 (2023). <https://doi.org/10.1002/vjch.202300022>
6. P. Singh, V. Bhankar, S. Kumar & K. Kumar. Biomass-derived carbon dots as significant biological tools in the medicinal field: A review. *Advances in Colloid and Interface Science*, **328**, 103182 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.cis.2024.103182>
7. Z. Li, Z. Liu, H. Sun & C. Gao. Superstructured assembly of nanocarbons: fullerenes, nanotubes, and graphene. *Chemical Reviews*, **115**(15), 7046–7117 (2015). <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00102>
8. M. Gaur, C. Misra, A.B. Yadav, S. Swaroop, F.Ó. Maolmhuaidh, M. Bechelany & A. Barhoum. Bio-medical applications of carbon nanomaterials: fullerenes, quantum dots, nanotubes, nanofibers, and graphene. *Materials*, **14**(20), 5978 (2021). <https://doi.org/10.3390/ma14205978>
9. V. Harish, D. Tewari, M. Gaur, A.B. Yadav, S. Swaroop, M. Bechelany & A. Barhoum. Review on nanoparticles and nanostructured materials: bioimaging, biosensing, drug delivery, tissue engineering, antimicrobial, and agro-food applications. *Nanomaterials*, **12**(3), 457 (2022). <https://doi.org/10.3390/nano12030457>
10. Y. Wang & A. Hu. Carbon quantum dots: synthesis, properties and applications. *Journal of Materials Chemistry C*, **2**(34), 6921–6939 (2014). <https://doi.org/10.1039/c4tc00988f>
11. S.E. Elugoke, G.E. Uwaya, T.W. Quadri & E.E. Ebenso. Carbon quantum dots: Basics, properties, and fundamentals. En: *Carbon Dots: Recent Developments and Future Perspectives*. ACS Symposium Series, 1465, 2024, pp. 3–42. <https://doi.org/10.1021/bk-2024-1465.ch001>
12. H.-L. Yang, L.-F. Bai, Z.-R. Geng, H. Chen, L.-T. Xu, Y.-C. Xie, D.-J. Wang, H.-W. Gu & X.-M. Wang. Carbon quantum dots: Preparation, optical properties, and biomedical applications. *Materials Today Advances*, **18**, 100376 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.mtadv.2023.100376>
13. A. Ben-Amor, H. Hemmami, I. Ben-Amor, S. Zeghoud, A.A. Alhamad, M. Belkacem, N.S. Nair & A.B. Sruthimol. Advances in carbon quantum dot applications: Catalysis, sensing, and biomedical innovations. *Materials Science in Semiconductor Processing*, **185**, 108945 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2024.108945>
14. B. Acharya, A. Behera, S. Behera & S. Moharana. Carbon quantum dots: A systematic overview of recent developments in synthesis, properties, and novel therapeutic applications. *Inorganic Chemistry Communications*, **165**, 112492 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2024.112492>
15. G.-W. Deng, N. Xu & W.-J. Li. Gate-defined quantum dots: Fundamentals and applications. En: P. Yu & Z. Wang (editores). *Quantum Dot Optoelectronic Devices*. Springer Cham, 2020, pp. 107–133. https://doi.org/10.1007/978-3-030-35813-6_4

16. L. Manna. The bright and enlightening science of quantum dots. *Nano Letters*, **23**(21), 9673–9676 (2023). <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.3c03904>
17. J. Cassidy & M. Zamkov. Nanoshell quantum dots: Quantum confinement beyond the exciton Bohr radius. *The Journal of Chemical Physics*, **152**(11), 110902 (2020). <https://doi.org/10.1063/1.5126423>
18. N. Azam, M.N. Ali & T.J. Khan. Carbon quantum dots for biomedical applications: Review and analysis. *Frontiers in Materials*, **8**, 700403 (2021). <https://doi.org/10.3389/fmats.2021.700403>
19. M.J. Molaei. Carbon quantum dots and their biomedical and therapeutic applications: a review. *RSC Advances*, **9**, 6460–6481 (2019). <https://doi.org/10.1039/c8ra08088g>
20. N.A. Pechnikova, K. Domvri, K. Porpodis, M.S. Istomina, A.V. Iaremenko & A.V. Yaremenko. Carbon quantum dots in biomedical applications: Advances, challenges, and future prospects. *Aggregate*, **6**(3), e707 (2025) <https://doi.org/10.1002/agt2.707>
21. X. Xu, R. Ray, Y. Gu, H.J. Ploehn, L. Gearheart, K. Raker & W.A. Scrivens. Electrophoretic analysis and purification of fluorescent single-walled carbon nanotube fragments. *Journal of the American Chemical Society*, **126**(40), 12736–12737 (2004). <https://doi.org/10.1021/ja040082h>
22. J. Kong, Y. Wei, F. Zhou, L. Shi, S. Zhao, M. Wan & X. Zhang. Carbon quantum dots: Properties, preparation, and applications. *Molecules*, **29**(9), 2002 (2024). <https://doi.org/10.3390/molecules29092002>
23. X. Guan, Z. Li, X. Geng, Z. Lei, A. Karakoti, T. Wu, P. Kumar, J. Yi & A. Vinu. Emerging trends of carbon-based quantum dots: Nanoarchitectonics and applications. *Small*, **19**(17), 2207181 (2023). <https://doi.org/10.1002/smll.202207181>
24. A.M. Díez-Pascual. Carbon-based nanomaterials. *International Journal of Molecular Sciences*, **22**(14), 7726 (2021). <https://doi.org/10.3390/ijms22147726>
25. L. Cui, X. Ren, M. Sun, H. Liu & L. Xia. Carbon dots: Synthesis, properties and applications. *Nanomaterials*, **11**(12), 3419 (2021). <https://doi.org/10.3390/nano11123419>
26. B. Wang, H. Cai, G.I.N. Waterhouse, X. Qu, B. Yang & S. Lu. Carbon dots in bioimaging, biosensing and therapeutics: A comprehensive review. *Small Science*, **2**(6), 2200012 (2022). <https://doi.org/10.1002/smssc.202200012>
27. Z.A. Qureshi, H. Dabash, D. Ponnamma & M.K.G. Abbas. Carbon dots as versatile nanomaterials in sensing and imaging: Efficiency and beyond. *Helijon*, **10**(11), e31634 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.helijon.2024.e31634>
28. H. Shabbir, E. Csapó & M. Wojnicki. Carbon quantum dots: The role of surface functional groups and proposed mechanisms for metal ion sensing. *Inorganics*, **11**(6), 262 (2023). <https://doi.org/10.3390/inorganics11060262>
29. M. Jorns & D. Pappas. A review of fluorescent carbon dots, their synthesis, physical and chemical characteristics, and applications. *Nanomaterials*, **11**(6), 1448 (2021). <https://doi.org/10.3390/nano11061448>
30. M. Ullah, U.A. Awan, H. Ali, A. Wahab, S.U. Khan, M. Naeem, M. Ruslin, A.Z. Mustopa & N. Hasan. Carbon dots: New rising stars in the carbon family for diagnosis and biomedical applications. *Journal of Nanotheranostics*, **6**(1), 1 (2025). <https://doi.org/10.3390/jnt6010001>
31. D. Ozyurt, M.A. Kobaisi, R.K. Hocking & B. Fox. Properties, synthesis, and applications of carbon dots: A review. *Carbon Trends*, **12**, 100276 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.cartre.2023.100276>
32. H. Liu, X. Zhong, Q. Pan, Y. Zhang, W. Deng, G. Zou, H. Hou & X. Ji. A review of carbon dots in synthesis strategy. *Coordination Chemistry Reviews*, **498**, 215468 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2023.215468>
33. B.D. Mansuriya & Z. Altintas. Carbon dots: Classification, properties, synthesis, characterization, and applications in health care—An updated review (2018–2021). *Nanomaterials*, **11**(10), 2525 (2021). <https://doi.org/10.3390/nano11102525>
34. Q. He & L. Zhang. Design of carbon dots as nanozymes to mediate redox biological processes. *Journal of Materials Chemistry B*, **11**, 5071–5082 (2023). <https://doi.org/10.1039/d2tb02259a>
35. H.H. Jing, F. Bardakci, S. Akgöl, K. Kusat, M. Adnan, M.J. Alam, R. Gupta, S. Sahreen, Y. Chen, S.C.B. Gopinath & S. Sasidharan. Green carbon dots: Synthesis, characterization, properties and

- biomedical applications. *Journal of Functional Biomaterials*, **14**(1), 27 (2023). <https://doi.org/10.3390/jfb14010027>
36. A. Barhoum, A. Meftahi, M.S.K. Sabery, M.E.M. Heravi & F. Alem. A review on carbon dots as innovative materials for advancing biomedical applications: synthesis, opportunities, and challenges. *Journal of Materials Science*, **58**, 13531–13579 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10853-023-08797-6>
37. S. Mourdikoudis, R.M. Pallares & N.T.K. Thanh. Characterization techniques for nanoparticles: comparison and complementarity upon studying nanoparticle properties. *Nanoscale*, **10**, 12871–12934 (2018). <https://doi.org/10.1039/c8nr02278j>
38. S. Das, S. Mondal & D. Ghosh. Carbon quantum dots in bioimaging and biomedicines. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, **11**, 1333752 (2024). <https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1333752>
39. P. Lesani, G. Singh, C.M. Viray, Y. Ramaswamy, D.M. Zhu, P. Kingshott, Z. Lu & H. Zreiqat. Two-photon dual-emissive carbon dot-based probe: Deep-tissue imaging and ultrasensitive sensing of intracellular ferric ions. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **12**(16), 18395–18406 (2020). <https://doi.org/10.1021/acsami.0c05217>
40. Y.-Y. Yao, G. Gedda, W.M. Girma, C.-L. Yen, Y.-C. Ling & J.-Y. Chang. Magnetofluorescent carbon dots derived from crab shell for targeted dual-modality bioimaging and drug delivery. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **9**(16), 13887–13899 (2017). <https://doi.org/10.1021/acsami.7b01599>
41. T. Vyas, S. Jaiswal, S. Choudhary, P. Kodgire & A. Joshi. Recombinant organophosphorus acid anhydrolase (OPAA) enzyme–carbon quantum dot (CQDs)–immobilized thin film biosensors for the specific detection of ethyl paraoxon and methyl paraoxon. *Environmental Research*, **243**, 117855 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117855>
42. X. Bao, Y. Yuan, J. Chen, B. Zhang, D. Li, D. Zhou, *et al.* *In vivo* theranostics with near-infrared-emitting carbon dots—highly efficient photothermal therapy based on passive targeting after intravenous administration. *Light: Science & Applications*, **7**, 91 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41377-018-0090-1>
43. W.B. Zhao, D.D. Chen, K.K. Liu, Y. Wang, R. Zhou, S.Y. Song, F.K. Li, L.Z. Sui, Q. Lou, L. Hou & C.X. Shan. Near-infrared I/II emission and absorption carbon dots via constructing localized excited/charge transfer state for multiphoton imaging and photothermal therapy. *Chemical Engineering Journal*, **452**(Part 2), 139231 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.139231>
44. K. Negi, N.K. Pathak, U. Tripathy, S.K. Dey & S.K. Sahu. Two-photon NIR-responsive carbon dots incorporated into NMOFs for targeted photodynamic therapy. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **694**, 134163 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.134163>
45. Z.M. Marković, M. Kovačova, P. Humpolíček, M.D. Budimir, J. Vajďák, P. Kubat, *et al.* Antibacterial photodynamic activity of carbon quantum dots/polydimethylsiloxane nanocomposites against *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* and *Klebsiella pneumoniae*. *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy*, **26**, 342–349 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.pdpdt.2019.04.019>
46. G. Çamlık, I. Ozakca, B. Bilakaya, A.T. Ozcelikay, A.J. Velaro, S. Wasnik & I.T. Degim. Development of composite carbon quantum dots–insulin formulation for oral administration. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, **76**, 103833 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jddst.2022.103833>
47. S. Samimi, M.S. Ardestani & F.A. Dorkoosh. Preparation of carbon quantum dots–quinic acid for drug delivery of gemcitabine to breast cancer cells. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, **61**, 102287 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jddst.2020.102287>
48. H. Wang, Z. Song, J. Gu, S. Li, Y. Wu & H. Han. Nitrogen-doped carbon quantum dots for preventing biofilm formation and eradicating drug-resistant bacteria infection. *ACS Biomaterials Science & Engineering*, **5**(9), 4739–4749 (2019). <https://doi.org/10.1021/acsbiomaterials.9b00583>
49. S.D. Hettiarachchi, R.M. Graham, K.J. Mintz, Y. Zhou, S. Vanni, Z. Peng & R.M. Leblanc. Triple conjugated carbon dots as a nano-drug delivery model for glioblastoma brain tumors. *Nanoscale*, **11**(3), 6192–6205 (2019). <https://doi.org/10.1039/c8nr08970a>
50. P. Tiwari, R.P. Shukla, K. Yadav, N. Singh, D. Marwaha, S. Gautam, A.K. Bakshi, N. Rai, A. Kumar, D. Sharma & P.R. Mishra. Dacarbazine-primed carbon quantum dots coated with breast cancer

cell-derived exosomes for improved breast cancer therapy. *Journal of Controlled Release*, **365**, 43–59 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.conrel.2023.11.005>

CÓMO CITAR ESTE ARTÍCULO

J. Maldonado-Villamizar. Puntos cuánticos de carbono: Un enfoque nanotecnológico para la encapsulación de fármacos. *Rev. Colomb. Cienc. Quim. Farm.*, **55**(1), 51–67 (2026). <https://doi.org/10.15446/rcciquifa.v55n1.120972>