

REALIDAD Y REFLEXIÓN ES UNA PUBLICACIÓN PERIÓDICA DE CARÁCTER SEMESTRAL DE LA UNIVERSIDAD FRANCISCO GAVIDIA.
AÑO 24, N° 60, JULIO-DICIEMBRE 2024. SAN SALVADOR, EL SALVADOR, CENTROAMÉRICA.

REALITY AND REFLECTION IS A BIENNIAL PERIODICAL PUBLICATION OF THE FRANCISCO GAVIDIA UNIVERSITY.
YEAR 24, N° 60, JULY-DECEMBER 2024. SAN SALVADOR, EL SALVADOR, CENTRAL AMERICA.

Caracterización óptica y estructural de nanopuntos de carbono sintetizados mediante carbonización directa de extractos de biomasa¹

Optical and structural characterization of carbon nanodots synthesized by direct carbonization of biomass extracts

Hamilton Alexander Ponce Elías

Licenciatura en Física, Universidad de El Salvador, El Salvador
Estudiante de Doctorado en Ciencias Físicas, Universidad de El Salvador, El Salvador
Investigador del Laboratorio de Nanotecnología, Facultad de Ingeniería y Sistemas,
Universidad Francisco Gavidia, El Salvador
hponce@ufg.edu.sv
<https://orcid.org/0000-0001-7867-0862>

Fecha de recepción: 15 de agosto de 2024
Fecha de aprobación: 18 de noviembre de 2024
DOI:



¹ Agradecimientos: se agradece a la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID, por sus siglas en inglés: *United States Agency for International Development*) por el financiamiento parcial de estos estudios. Asimismo, se extiende un agradecimiento al Dr. Erick Ramos y al Dr. Freddy González de la Universidad Centroamericana José Simeón Cañas por su apoyo en la realización de algunos análisis de absorbancia. Finalmente, se reconoce y agradece las discusiones y revisiones realizadas por Ricardo Estrada.

RESUMEN

Los nanopuntos de carbono (CNDs) son estructuras a escalas nanométricas, con propiedades ópticas y electrónicas de interés para su implementación en el desarrollo de tecnologías sostenibles. Estos se pueden obtener de manera fácil y con un reducido impacto ambiental mediante la carbonización directa de biomasa en presencia de oxígeno. Sin embargo, debido a los pocos estudios sobre CNDs sintetizados mediante este método, aún no se comprenden por completo sus propiedades ópticas, electrónicas y estructurales. Por lo tanto, con el fin de abonar a la comprensión de estas propiedades de los CNDs sintetizados, en este trabajo se presenta la síntesis de CNDs mediante la carbonización directa de diferentes fuentes de biomasa como extractos de limón, naranja, melón, cúrcuma, zanahoria, papa, tomate, chile y ciruela. Las muestras de CNDs se caracterizaron utilizando las técnicas de microscopía electrónica de barrido (SEM), espectroscopia de absorbancia (Ab) y fotoluminiscencia (PL). Las medidas SEM muestran tamaños de CNDs alrededor de 30 nm a 60 nm de diámetro, por otra parte, los espectros de Ab mostraron tres bandas en común a 230 nm, 300 nm y 380 nm. Atribuibles a transiciones $\pi-\pi^*$ de los enlaces C=C, transiciones $n-\pi^*$ de los enlaces C=O y al dopamiento con N y Si, respectivamente. Se observó una intensa PL en el rango de 425 nm a los 750 nm, lo que las hace buenas candidatas para aplicaciones en iluminación de luz blanca, entre otras aplicaciones.

Palabras clave: *nanopuntos de carbono (CNDs), carbonización, fotoluminiscencia, absorción, biomasa.*

ABSTRACT

Carbon nanodots (CNDs) are nanoscale structures with optical and electronic properties of interest for their implementation in the development of sustainable technologies. They can be easily obtained with a reduced environmental impact by direct carbonization of biomass in the presence of oxygen. However, due to the few studies on CNDs synthesized by this method, their optical, electronic and structural properties are not yet fully understood. Therefore, in order to contribute to the understanding of these properties of the synthesized CNDs, this work presents the synthesis of CNDs by direct carbonization of different biomass sources such as lemon, orange, melon, turmeric, carrot, potato, tomato, chili and plum extracts. The CND samples were characterized using scanning electron microscopy (SEM), absorbance (Ab) and photoluminescence (PL) spectroscopy techniques. SEM measurements show CNDs sizes around 30 nm to 60 nm in diameter, on the other hand, Ab spectra showed three common bands at 230 nm, 300 nm and 380 nm. These were attributed to $\pi-\pi^$ transitions of C=C bonds, $n-\pi^*$ transitions of C=O bonds and N and Si doping, respectively. Intense PL was observed in the range from 425 nm to 750 nm, making them good candidates for white light emission applications, among others.*

Keywords: *carbon nanodots (CNDs), carbonization, photoluminescence, absorption, biomass.*

Introducción

Los materiales a base de carbono adquieren propiedades destacadas cuando se reducen a escalas nanométricas, debido al confinamiento que experimentan sus portadores de carga en las tres dimensiones espaciales. Actualmente, se han desarrollado diversos tipos de nanoestructuras de carbono, como los nanotubos de carbono, fullerenos, puntos de carbono y puntos cuánticos de carbono, entre otros. Los puntos cuánticos de carbono (CQDs, por sus siglas en inglés: *Carbon Quantum Dots*) suelen definirse como estructuras con un núcleo cristalino compuesto por una mezcla de carbonos con enlaces tipo sp^2 y sp^3 . Estos puntos se caracterizan por el efecto de confinamiento cuántico, que implica una dependencia de sus propiedades ópticas y electrónicas respecto al tamaño (Vercelli, 2021; Wang y Hu, 2014). Por ejemplo, la emisión y absorción de luz se desplazan hacia el azul a medida que disminuye el tamaño de los CQDs. Por otra parte, los nanopuntos de carbono (CNDs, por sus siglas en inglés: *Carbon Nano Dots*), son definidos como nanopartículas carbónicas cuasi esféricas con un núcleo estructural amorfo. En el caso de los CNDs, no está claro si obedecen al efecto de confinamiento cuántico. Cabe señalar que algunos autores emplean los términos CNDs y CQDs de manera indistinta. Estas estructuras han suscitado un gran interés por su potencial tecnológico mostrado en investigaciones que buscan comprender mejor sus propiedades, tanto a nivel mundial como en El Salvador (Cuadra *et al.*, 2018; Cui *et al.*, 2021; Deodanes *et al.*, 2020).

Los CQDs y los CNDs suelen sintetizarse mediante dos enfoques: *top-down* y *bottom-up*. En el enfoque *top-down* se utilizan métodos de síntesis como procesos electroquímicos, ablación láser y descarga de arco eléctrico (Yadav *et al.*, 2023). Por otro lado, el enfoque *bottom-up* incluye métodos como la síntesis hidrotermal, combustión, microondas, pirólisis o carbonización, y deposición química en fase vapor, entre otros (Wang y Hu, 2014; Yadav *et al.*, 2023). Dichas estructuras presentan características ópticas y electrónicas similares a los puntos cuánticos semiconductores convencionales, como emisión y absorción de luz sintonizable, funcionalización, entre otras. Estas propiedades las convierten en candidatas para diversas aplicaciones, como material activo en la construcción de diodos emisores de luz, celdas solares, bioimágenes, diagnóstico médico, administración de fármacos, catálisis y circuitos lógicos (Kaur *et al.*, 2022; Liu *et al.*, 2017a; Ma *et al.*, 2015). Además, los CNDs representan una alternativa respetuosa con el medio ambiente y una oportunidad para desarrollar tecnología biodegradable, contrastando con la toxicidad de nanoestructuras basadas en elementos como Cd y Pb.

Un método que ha generado interés es la síntesis basada en materiales de bajo costo, como la biomasa obtenida de frutas y verduras. En particular, se ha informado sobre la obtención de CNDs mediante técnicas hidrotermales, microondas y pirólisis utilizando biomasa como material precursor. Entre las fuentes de biomasa reportadas se encuentran el melón (Desai *et al.*, 2019), el limón (He *et al.*, 2018), el tomate (Liu *et al.*, 2017b), el agua de coco (Manoharan *et al.*, 2020), la manzana (Borna *et al.*, 2021), entre otros. Estos métodos destacan por ser accesibles, de bajo costo y con una toxicidad

reducida. Un método de síntesis más simplificado es la carbonización directa en condiciones ambientales comunes (en presencia de oxígeno) (Cuadra *et al.*, 2018; Cui *et al.*, 2021; Ma *et al.*, 2015; Ponce *et al.*, 2023). Aunque menos estudiado, este método presenta limitaciones debido a que los CNDs sintetizados tienden más a la oxidación, lo que podría no ser beneficioso para aplicaciones como láseres o celdas solares, ya que la oxidación genera defectos que pueden actuar como trampas y afectar la eficiencia cuántica de los CNDs. Sin embargo, dicha oxidación podría ser ventajosa en aplicaciones como diodos emisores de luz, ya que los defectos podrían ser luminiscentes. Por este motivo, el presente trabajo estudia la síntesis de CNDs mediante carbonización directa de nueve fuentes de biomasa en presencia de oxígeno. Así también sus características estructurales, ópticas y electrónicas.

Metodología

Preparación de muestras

En el presente trabajo, se utilizó el método de carbonización directa de biomasa en condiciones ambientales, similar a lo descrito en un estudio previo (Cuadra *et al.*, 2018; Ponce *et al.*, 2023). A continuación, se describirá en términos generales, la preparación de extractos precursores de CNDs para el caso de nueve fuentes de biomasa clasificadas en tres grupos, aplicándose un método de extracción diferente para cada grupo.

Para el primer grupo, compuesto por limón, naranja y melón, se utilizó el mismo procedimiento; por lo tanto, solo se explicará el proceso de síntesis para el caso del limón, y este se hace extensivo a naranja y melón. Se extrajeron 50 ml de jugo de limón puro, el cual se filtró utilizando papel filtro para café y se depositó en un vaso de precipitado de 200 ml. El jugo de limón se calentó a 100 °C en condiciones ambientales, colocando el vaso de precipitado sobre una placa calefactora. Se mantuvo a esta temperatura hasta que el jugo se evaporó casi por completo, momento en el cual se observó un cambio de color, de marrón claro a marrón oscuro, lo que se interpretó como la formación de CNDs. Posteriormente, se dejó enfriar a temperatura ambiente y se agregó agua desmineralizada. La solución resultante se centrifugó, proceso mediante el cual se separaron dos fases: una sólida, que precipitó, y una líquida, que quedó como sobrenadante. Se retiró la fase líquida, que contenía los CNDs, y se almacenó para su posterior análisis.

Para el segundo grupo, compuesto por cúrcuma, zanahoria y papa, se preparó un extracto de solución de cada tubérculo, siguiendo un procedimiento similar al descrito por otros autores (Yan *et al.*, 2023). A continuación, se detalla el proceso para la cúrcuma, siendo extensivo a las soluciones precursoras de zanahoria y papa. La cúrcuma en tubérculo (100 g), adquirida en un supermercado local, se lavó para retirar la suciedad. Posteriormente, fue triturada en un mortero. La cúrcuma triturada se transfirió a un vaso de precipitado de 200 ml, añadiéndole etanol hasta cubrirla, y se dejó reposar durante una hora a temperatura ambiente. Transcurrido este tiempo, la mezcla resultante se filtró y se depositó en un

vaso de precipitado de 200 ml. Posteriormente, se realizó el mismo proceso de carbonización directa descrito anteriormente para el jugo de limón, similar a lo documentado en un trabajo previo (Ponce *et al.*, 2023). Después de dejar enfriar a temperatura ambiente, se agregó agua desmineralizada, y la solución resultante se centrifugó, siguiendo el procedimiento previamente descrito.

Para el tercer grupo, compuesto por tomate, chile y ciruela, se empleó una metodología similar a la descrita en un trabajo previo (Ponce *et al.*, 2023). A continuación, se detalla el proceso para los CNDs obtenidos a partir del tomate, siendo extensivo a los elaborados con biomasa de chile y ciruela. Un tomate adquirido en un supermercado local fue sometido a la remoción de semillas y cáscara. Posteriormente, la pulpa se colocó en un vaso de precipitado, añadiendo agua desmineralizada hasta cubrirla. Este vaso de precipitado se calentó a 100 °C durante cuarenta minutos sobre una placa calefactora. Pasado este tiempo, se dejó enfriar a temperatura ambiente. El líquido resultante se extrajo mediante filtración con papel filtro para café y se transfirió a un vaso de precipitado. Nuevamente, se calentó a 100 °C sobre una placa calefactora hasta casi evaporarse por completo. En este punto, se observó un cambio de coloración, de naranja a marrón oscuro, lo que se interpretó como la presencia de los CNDs. Finalmente, se añadió agua destilada, obteniendo una solución que contenía los CNDs, y se centrifugó según lo descrito anteriormente.

Determinación de tamaños de los CNDs mediante microscopía electrónica de barrido

Los tamaños de los CNDs se estimaron utilizando un equipo de microscopía electrónica de barrido (SEM, por sus siglas en inglés: *Scanning Electron Microscope*), modelo VEGA-3w de la marca TESCAN. Para la preparación de las muestras, se tomó una gota de la solución que contenía los CNDs y se diluyó en 1 ml de agua desmineralizada. De esta nueva solución, se depositaron dos gotas sobre un portamuestras de aluminio tipo Pin Stub, plano, con un diámetro de 12.7 mm, apto para el vacío, y se dejó secar a temperatura ambiente. Posteriormente, se realizó un secado al vacío y un recubrimiento con una fina capa de oro/paladio (Au/Pd) mediante la técnica de pulverización catódica (conocida en inglés como *sputtering*). Finalmente, las muestras se introdujeron al SEM.

Espectroscopia de absorbancia de las soluciones de CNDs

Para la toma de espectros de absorbancia (Ab) de las soluciones que contenían los CNDs, se utilizó un espectrógrafo con una resolución de aproximadamente 2 nm de ancho de banda y un rango espectral de 190 nm a 1100 nm. Como fuente de luz, se empleó una combinación de lámparas deuterio-tungsteno. Las muestras se diluyeron inicialmente en una proporción aproximada de una parte de la solución que contenía los CNDs por 100 partes de agua desmineralizada. Esta dilución podía ser mayor o menor dependiendo de la muestra en estudio y tenía como objetivo hacer visibles las bandas de absorción de los CNDs, que se encuentran normalmente en el rango ultravioleta-visible. Finalmente, esta dilución se depositó en cubetas de cuarzo para la obtención de los espectros de absorbancia.

Fotoluminiscencia

Para la toma de espectros de fotoluminiscencia (PL, por sus siglas en inglés: *PhotoLuminiscence*) de las soluciones que contenían los CNDs, se utilizó un espectrógrafo con una resolución espectral aproximada de 12 nm y una ventana espectral de detección entre 350 nm y 850 nm. Para la excitación de los portadores de carga, se empleó un diodo emisor de luz (LED, por sus siglas en inglés: *Light Emitting Diode*), con una banda de fotoluminiscencia aproximadamente centrada en 365 nm. La luz emitida por la muestra en estudio se recolectó a 90 grados respecto al haz de excitación, con el propósito de minimizar la luz reflejada.

Tratamiento de datos

Para el cálculo de los máximos y anchuras de las bandas en los espectros de PL y Ab, se utilizó ajustes gaussianos.

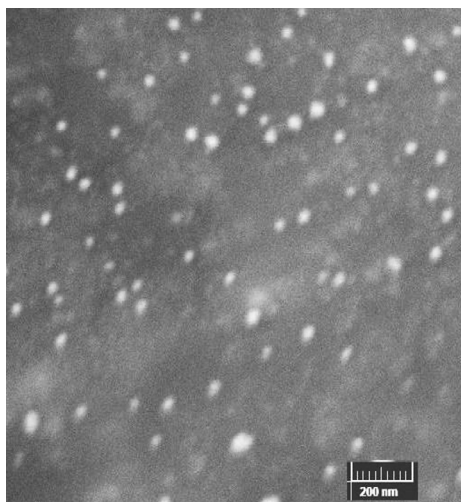
Resultados

Estimación de tamaño de los CNDs

El tamaño de las nanoestructuras se determinó mediante microscopía electrónica de barrido. Las nueve muestras se prepararon siguiendo la metodología descrita anteriormente. A través de esta técnica, se estableció que, para las nueve muestras analizadas, los tamaños de los CNDs oscilaron entre 30 nm y 60 nm. En la Figura 1 se presenta una imagen obtenida mediante microscopía electrónica de barrido, correspondiente a CNDs sintetizados a partir de extracto de chile verde, mostrada con una escala de 200 nm y una distribución de CNDs en el rango de 30 nm a 60 nm.

Figura 1

Fotografías mediante microscopía electrónica de barrido de nanoestructuras a base de chile



Fuente: elaboración propia.

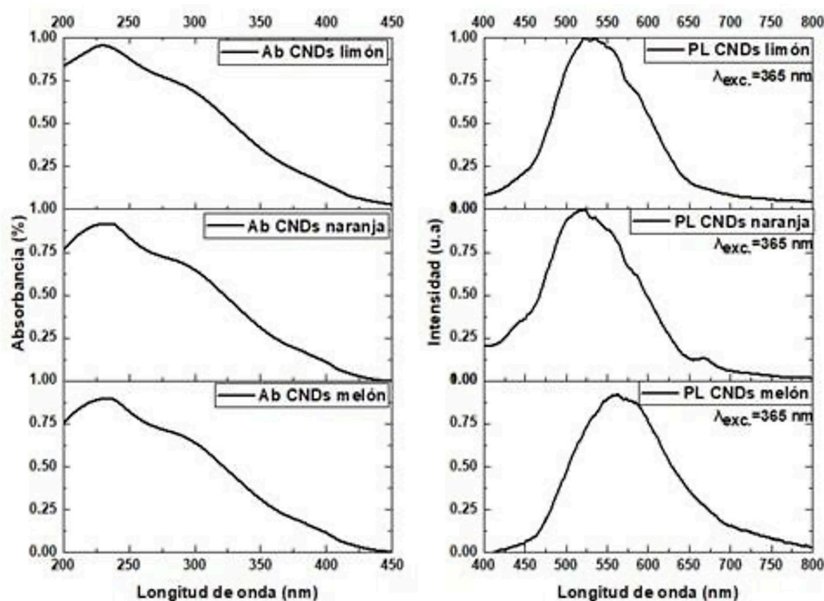
Caracterización óptica de CNDs de jugo de limón, naranja y melón

Las muestras se caracterizaron mediante espectros de absorbancia (Ab) y fotoluminiscencia (PL), cuyos resultados se presentan en la Figura 2. En dicha figura, se muestran a la izquierda y de forma descendente los espectros de Ab en el rango de 200 nm a 400 nm para los CNDs sintetizados a partir de jugo de limón, naranja y melón, respectivamente. En los tres espectros de absorción, se observan tres bandas predominantes, calculadas aproximadamente en las longitudes de onda de 230 nm, 300 nm y 380 nm. Estas tres bandas se presentaron en la misma longitud de onda para las muestras que contienen CNDs de limón, naranja y melón. Además, se determinó que las anchuras a media altura de dichas bandas fueron muy similares: 61 nm, 74 nm y 61 nm, para los CNDs de limón, naranja y melón, respectivamente.

En la columna del lado derecho de la Figura 2, se muestran de forma descendente los espectros de PL en el rango de 400 nm a 800 nm, bajo una fuente de excitación de un diodo emisor de luz con una banda centrada aproximadamente en 365 nm, para los CNDs sintetizados a partir de extractos de biomasa de limón, naranja y melón. Dichos espectros se presentan normalizados al máximo de PL. En los tres casos, la PL mostró estar compuesta por al menos cinco bandas, calculadas en las longitudes de onda de 449 nm, 509 nm, 553 nm, 591 nm y 667 nm.

Figura 2

Espectros de absorbancia (izquierda) y espectros de emisión (derecha), para CNDs sintetizados a base de limón, naranja y melón



Fuente: elaboración propia.

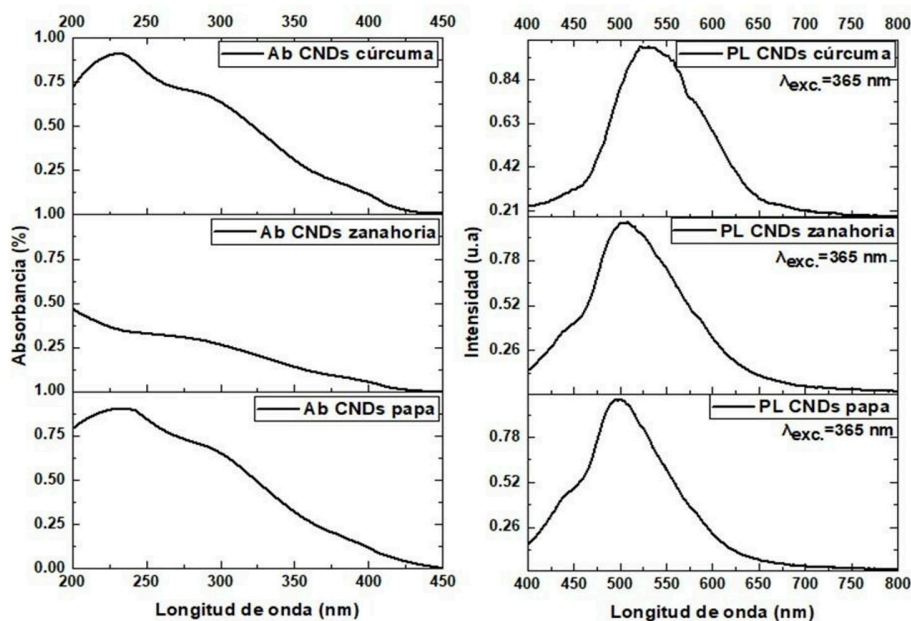
Caracterización óptica de CNDs de extracto de cúrcuma, zanahoria y papa

En las columnas del lado izquierdo de la Figura 3, se muestran de forma descendente los espectros de absorbancia (Ab) en el rango de 200 nm a 400 nm, correspondientes a los CNDs sintetizados a partir de extractos de cúrcuma, zanahoria y papa, respectivamente. Los espectros de absorción para las muestras que contenían CNDs sintetizados a partir de extractos de cúrcuma y papa mostraron al menos tres bandas predominantes, centradas aproximadamente en las longitudes de onda de 230 nm, 300 nm y 380 nm. Por otro lado, los espectros de absorción de los CNDs sintetizados a partir de extracto de zanahoria, en el rango de 200 nm a 450 nm, mostraron dos bandas con máximos en las longitudes de onda de 300 nm y 380 nm.

En las columnas del lado derecho de la Figura 3, se presentan de forma descendente los espectros de fotoluminiscencia (PL) para los CNDs de cúrcuma, zanahoria y papa, en el rango de 400 nm a 800 nm, utilizando como fuente de excitación un diodo emisor de luz ultravioleta con un máximo de banda centrado en 365 nm. En los tres espectros, se observó que están compuestos por al menos cinco bandas, calculadas en las longitudes de onda de 449 nm, 509 nm, 553 nm, 591 nm y 667 nm.

Figura 3

Espectros de absorbancia (izquierda) y espectros de emisión (derecha), para CNDs sintetizados a base de cúrcuma, zanahoria y papa



Fuente: elaboración propia.

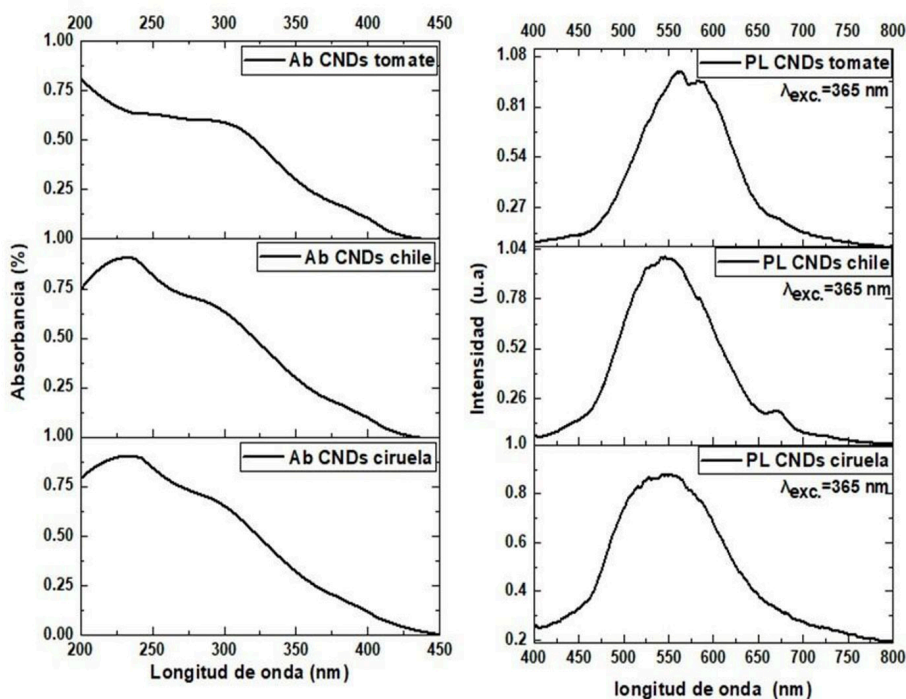
Caracterización óptica de CNDs de tomate, chile verde y ciruela

En las columnas del lado izquierdo de la Figura 4, se presentan los espectros de absorbancia (Ab) en el rango de 200 nm a 450 nm, correspondientes a los CNDs sintetizados a partir de biomasa de tomate, chile verde y ciruela. Estos espectros mostraron tres bandas, cuyos máximos se calcularon en las longitudes de onda de 230 nm, 300 nm y 380 nm, de manera similar a lo descrito anteriormente.

En las columnas del lado derecho de la Figura 4, se presentan de forma descendente los espectros de fotoluminiscencia (PL) para los CNDs de tomate, chile verde y ciruela, en el rango de 400 nm a 800 nm, utilizando como fuente de excitación un diodo emisor de luz ultravioleta con un máximo de banda centrado en 365 nm. En los tres espectros, se observó que están compuestos por al menos cinco bandas, calculadas en las longitudes de onda de 449 nm, 509 nm, 553 nm, 591 nm y 667 nm.

Figura 4

Espectros de absorbancia (izquierda) y espectros de emisión (derecha), para CNQs sintetizados a base de tomate, chile y ciruela



Fuente: elaboración propia.

Discusión

En el presente trabajo se llevó a cabo la síntesis de CNDs utilizando extractos de biomasa provenientes de nueve fuentes diferentes como precursores. Los extractos se prepararon mediante tres métodos distintos: extracción directa del jugo para limón, naranja y melón; extracción mediante trituración y adición de solvente para cúrcuma, zanahoria y papa; y extracción con solvente mediante la aplicación de calor para tomate, chile verde y ciruela. Los CNDs obtenidos a partir de estos extractos mostraron resultados muy similares. Se observó que, en los nueve casos estudiados, los tamaños de las nanoestructuras se encontraban en el rango de 30 nm a 60 nm. También se constató que el método de carbonización directa empleado es fácil de reproducir, a pesar de realizarse en presencia de oxígeno. Las propiedades ópticas y electrónicas de estos materiales resultan prometedoras para aplicaciones en tecnologías como los diodos emisores de luz, entre otras.

En la Figura 5 se presenta un ejemplo de una muestra de CNDs preparada a partir de extracto de chile verde. Todas las muestras preparadas muestran propiedades de fotoluminiscencia (PL) que, a simple vista, son muy similares a las fotografías mostradas en la Figura 5. En dicha figura, a la izquierda se observa un vial con la solución que contiene los CNDs bajo luz ambiente, y a la derecha, la misma muestra iluminada con una lámpara tipo diodo emisor de luz ultravioleta, con una banda de emisión centrada aproximadamente en 365 nm.

Figura 5

Muestra de solución que contiene los CNDs sintetizados: a la izquierda, bajo luz ambiente, a la derecha bajo radiación ultravioleta



Fuente: elaboración propia.

Para todos los espectros de absorbancia mostrados en este trabajo, excepto para las muestras de CNDs sintetizados a base de extracto de zanahoria, se pudieron apreciar tres bandas predominantes, las cuales se calcularon centradas aproximadamente a 230 nm, 300 nm y 380 nm. Dichas bandas son asociadas a transiciones $\pi-\pi^*$ del núcleo de las nanoestructuras, transiciones $n-\pi^*$, de los enlaces $C=O$ y a dopamiento de estas con nitrógeno-silicio respectivamente (Carbonaro *et al.*, 2019; Liu *et al.*, 2017a; Wang *et al.*, 2021; Yan *et al.*, 2023). Los espectros de absorción de CNDs sintetizados a base de extractos de zanahoria mostraron dos bandas de absorción, en el rango de 200 nm a 450 nm, ubicada alrededor de 300 nm y 380 nm, y se atribuyen a las transiciones $n-\pi^*$, de los enlaces $C=O$ y a posibles dopamiento con nitrógeno-silicio entre otros compuestos, similar a lo descrito por otros autores (Liu *et al.*, 2017a; Liu *et al.*, 2017b; Sinha *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2021).

Para las nueve muestras estudiadas en este trabajo, los espectros de fotoluminiscencia (PL) mostraron cinco bandas centradas aproximadamente en 449 nm, 509 nm, 553 nm, 591 nm y 667 nm, las cuales se mantuvieron en las mismas longitudes de onda, independientemente del método de preparación del extracto de biomasa o de la fuente de biomasa utilizada. Para los CNDs obtenidos a partir de extractos de zanahoria y papa, los máximos observados en 409 nm y 553 nm se presentaron con mayor intensidad. En el caso de los CNDs sintetizados a partir de extractos de limón, naranja, cúrcuma y chile verde, las bandas de PL a 553 nm y 591 nm mostraron una mayor intensidad. Para los CNDs sintetizados a partir de extractos de melón y tomate, también se observó que las bandas a 553 nm y 591 nm tenían mayor intensidad. Por último, en los CNDs sintetizados a partir de extractos de ciruela, las bandas predominantes fueron las centradas en 509 nm, 553 nm y 591 nm.

La emisión multibanda observada en los CNDs en este estudio ya ha sido reportada previamente para estructuras obtenidas a partir de biomasa (Ponce *et al.*, 2023). Por otro lado, estas características de emisión multibanda en las mismas longitudes de onda podrían deberse a la presencia de una composición química similar en la biomasa, compuesta por elementos como C, N, S, P, Si y Al, aunque con diferentes concentraciones. Estas diferencias en las concentraciones podrían explicar por qué ciertas bandas de PL predominan en los CNDs derivados de diferentes biomásas. Asimismo, se observó que elementos químicos como el Si favorecen la predominancia de bandas de emisión cercanas al rojo, lo que genera un aparente desplazamiento al rojo en los espectros de PL de estas nanoestructuras.

Lo expuesto evidencia que las propiedades de absorbancia y fotoluminiscencia de las soluciones que contienen los CNDs presentan bandas muy similares. En el caso de la absorbancia, estos resultados son de gran interés, ya que una de las limitaciones habituales de estas estructuras es que su absorbancia suele localizarse en el ultravioleta. Sin embargo, los CNDs mostraron una banda en el rango de 350 nm a 450 nm, centrada en 380 nm. Los espectros de PL fueron muy similares para todas las fuentes de biomasa estudiadas, demostrando que estas estructuras presentan emisión en todo el rango visible, lo que resulta relevante para aplicaciones en iluminación de luz blanca.

En conclusión, se han presentado en este documento los resultados de la caracterización óptica y estructural de CNDs sintetizados mediante carbonización directa de nueve fuentes de biomasa en presencia de oxígeno. Los espectros de absorbancia de los CNDs sintetizados muestran bandas que abarcan desde el ultravioleta hasta 450 nm. Los espectros de fotoluminiscencia (PL) evidencian emisión en el rango de 400 nm a 750 nm. En dichos espectros, se observó que están compuestos por al menos cinco bandas que permanecieron fijas, independientemente del extracto de biomasa utilizado, variando únicamente en intensidad entre ellas. Esto puede atribuirse a que los CNDs tienen una composición química similar, pero con diferencias en sus concentraciones.

Estos resultados muestran un método de síntesis de bajo costo y gran simplicidad para la obtención de CNDs amigables con el medio ambiente, con un potencial significativo para aplicaciones en tecnologías como la fabricación de diodos emisores de luz blanca y celdas solares. Además, debido a que se obtienen a partir de biomasa, se espera que posean buena biocompatibilidad, lo que abre posibilidades para su uso en campos como la biomedicina, entre otros.

Referencias

- Borna, S., Sabzi, R. E. y Pirsá, S. (2021). Synthesis of carbon quantum dots from apple juice and graphite: investigation of fluorescence and structural properties and use as an electrochemical sensor for measuring Letrozole. *J Mater Sci: Mater Electron*, 32, pp. 10866–10879. <https://doi.org/10.1007/s10854-021-05745-5>
- Carbonaro, C. M., Corpino, R., Salis, M., Mocci, F., Thakkar, S. V., Olla, C. y Ricci, P. C. (2019). On the Emission Properties of Carbon Dots: Reviewing Data and Discussing Models. *C — Journal of Carbon Research*, 5, pp. 1-15. <https://doi.org/10.3390/c5040060>
- Cuadra, J., Ponce, H. y Rudamas, C. (2018). Optical Properties of Graphene Carbon Quantum Dots for Solar Cells Applications. *Proceedings of IEEE 2018 38th Central America and Panama Convention (CONCAPAN XXXVIII)*, pp. 1-5. San Salvador, El Salvador. DOI: 10.1109/CONCAPAN.2018.8596611
- Cui, L., Ren, X., Sun, M., Liu, H. y Xia, L. (2021). Carbon Dots: Synthesis, Properties and Applications. *Nanomaterials*, 11, pp. 2-38. <https://doi.org/10.3390/nano11123419>
- Desai, M. L., Jha, S., Basu, H., Singhal, R. K., Park, T. J. y Kailasa, S. K. (2019). Acid Oxidation of Muskmelon Fruit for the Fabrication of Carbon Dots with Specific Emission Colors for Recognition of Hg²⁺ Ions and Cell Imaging. *ACS omega*, 4(21), pp. 19332–19340. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b02730>
- Deodanes, O., Molina, J. C., Violantes, C., Pleítez, D., Cuadra, J., Ponce, H. y Rudamas, C. (2020). White Light Emitting CdS Quantum Dot Devices Coated with Layers of Graphene Carbon Quantum Dots. *MRS Avances*, 5, pp. 3337 - 3343. <https://doi.org/10.1557/adv.2020.436>
- He, M., Zhang, J., Wang, H., Kong, Y., Xiao, Y. y Xu, W. (2018). Material and Optical Properties of Fluorescent Carbon Quantum Dots Fabricated from Lemon Juice via Hydrothermal Reaction.

- Nanoscale Research Letters*, 13, pp. 1-7. doi: [10.1186/s11671-018-2581-7](https://doi.org/10.1186/s11671-018-2581-7)
- Kaur, A., Pandey, K., Kaur, R., Vashishat, N. y Kaur, M. (2022). Nanocomposites of Carbon Quantum Dots and Graphene Quantum Dots: Environmental Applications as Sensors. *Chemosensors*, 10(9), 367. <https://doi.org/10.3390/chemosensors10090367>
- Liu, Y., Liu, Y., Park, M., Park, S. J., Zhang, Y., Akanda, M. R., Park, B. Y. y Kim, H. Y. (2017a). Green synthesis of fluorescent carbon dots from carrot juice for in vitro cellular imaging. *Carbon Letters*, 21(1), pp. 61-67. <https://doi.org/10.5714/CL.2017.21.061>
- Liu, W., Li, C., Sun, X., Pan, W., Yu, G. y Wang, J. (2017b). Highly crystalline carbon dots from fresh tomato: UV emission and quantum confinement. *Nanotechnology*, 28, pp. 1-18. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/aa900b>
- Ma, C-B., Zhu, Z-T., Wang, H-X., Huang, X., Zhang, X., Qi, X., Zhang, H-L., Zhu, Y., Deng, X., Peng, Y., Hand, Y. y Zhang, H. (2015). A general solid-state synthesis of chemically doped fluorescent graphene quantum dots for bioimaging and optoelectronic applications. *Nanoscale*, 7, pp. 10162-10169. DOI: [10.1039/c5nr01757b](https://doi.org/10.1039/c5nr01757b)
- Manoharan, P., Dhanabalan, S. C., Alagan, M., Muthuvijayan, S., Ponraj, J. S. y Somasundaram, C. K. (2020). Facile synthesis and characterisation of green luminescent carbon nanodots prepared from tender coconut water using the acid-assisted ultrasonic route. *Micro & Nano Letters*, 15, pp. 920-924. doi: [10.1049/mnl.2020.0101](https://doi.org/10.1049/mnl.2020.0101)
- Ponce, H. A., Cuadra, J. A., Menjívar, J. C., Deodanes, O. A., Cisneros, N. F. y Rudamas, C. E. (2023). Caracterización óptica y estructural de puntos cuánticos de carbono a base de tomate (*lycopersicon esculentum* Mill). *Realidad y Reflexión*, 1(57), pp. 122-136. <https://doi.org/10.5377/ryr.v1i57.16706>
- Sinha, R., Bidkar, A. P., Rajasekhar, R., Ghosh, S. S. y Mandal, T. K. (2020). A facile synthesis of nontoxic luminescent carbon dots for detection of chromium and iron in real water sample and bio-imaging. *Can J Chem Eng*, pp. 1-11. DOI: [10.1002/cjce.23630](https://doi.org/10.1002/cjce.23630)
- Vercelli, B. (2021). The Role of Carbon Quantum Dots in Organic Photovoltaics: A Short Overview. *Coatings*, 11, 232. <https://doi.org/10.3390/coatings11020232>
- Wang, Y. y Hu, A. (2014). Carbon quantum dots: synthesis, properties and applications. *J. Mater. Chem. C*, 2, 6921. DOI: [10.1039/c4tc00988f](https://doi.org/10.1039/c4tc00988f)
- Wang, X., Liu, Y., Wang, Q., Bu, T., Sun, X., Jia, P. y Wang, L. (2021). Nitrogen, silicon co-doped carbon dots as the fluorescence nanoprobe for trace p-nitrophenol detection based on inner filter effect. *Science direct*, 244, 118876. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2020.118876>
- Yadav, P. K., Chandra, S., Kumar, V., Kumar, D. y Hasan, S.H. (2023). Carbon Quantum Dots: Synthesis, Structure, Properties, and Catalytic Applications for Organic Synthesis. *Catalysts*, 13, 422. <https://doi.org/10.3390/catal13020422>
- Yan, H., Li, P., Wen, F., Xu, Q., Guo, Q. y Su, W. (2023). Green synthesis of carbon quantum dots from plant turmeric holds promise as novel photosensitizer for in vitro photodynamic antimicrobial activity. *Journal of Materials Research and Technology*, 22, pp. 17-34, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.11.090>