

## Síntesis de puntos cuánticos del carbono

### Synthesis of carbon quantum dots

Escalante Magallanes Oscar André<sup>1</sup>, Flores Ferreira Juan José<sup>2</sup>, Marmolejo Zavala Abril<sup>3</sup>, Nava Martínez Jesús Antonio<sup>4</sup>, Ordaz Martínez Juan Diego<sup>5</sup>, Perez Juarez Nayeli<sup>6</sup>, Galindo González María del Rosario<sup>7</sup>.

<sup>1,2,3,4,5,6</sup> División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato, Noria Alta s/n, 36050, Guanajuato, Gto, México.

<sup>7</sup> Cátedra CONACYT adscrita a la división de Ciencias Naturales y Exactas, Universidad de Guanajuato, Cerro de la Venada s/n, Pueblito de Rocha, 36040, Guanajuato, Gto, México.

[oa.escalantemagallanes@ugto.mx](mailto:oa.escalantemagallanes@ugto.mx)<sup>1</sup> [a.marmolejozavala@ugto.mx](mailto:a.marmolejozavala@ugto.mx)<sup>2</sup> [ja.navamartinez@ugto.mx](mailto:ja.navamartinez@ugto.mx)<sup>3</sup> [jd.ordazmartinez@ugto.mx](mailto:jd.ordazmartinez@ugto.mx)<sup>4</sup> [n.perezjuarez@ugto.mx](mailto:n.perezjuarez@ugto.mx)<sup>5</sup> [jj.floresferreira@ugto.mx](mailto:jj.floresferreira@ugto.mx)<sup>6</sup> [mr.galindo@ugto.mx](mailto:mr.galindo@ugto.mx)<sup>7</sup>

## Resumen

Los puntos cuánticos a base de carbono son nanoestructuras esféricas de tamaño nanométrico, generalmente alrededor de 3 nanómetros de diámetro. Estos puntos cuánticos exhiben propiedades ópticas y electrónicas de gran interés tecnológico debido a su confinamiento cuántico y a la presencia de grupos funcionales en su superficie. Algunas aplicaciones destacadas de los puntos cuánticos de carbono incluyen:

1. **Biosensores:** Pueden utilizarse como biosensores para detectar moléculas específicas en sistemas biológicos.
2. **Liberación controlada de fármacos:** Su pequeño tamaño y capacidad para transportar moléculas los hacen ideales para sistemas de liberación controlada de medicamentos.
3. **Bioimagen:** Los puntos cuánticos de carbono se emplean en técnicas de imagenología para visualizar células y tejidos con alta precisión.
4. **Agentes fotosensibilizadores:** Debido a su fotoluminiscencia, biocompatibilidad y baja toxicidad, los puntos cuánticos también se utilizan como agentes fotosensibilizadores en terapias fotodinámicas.

**Palabras clave:** Nanopartículas, Puntos Cuánticos de Carbono, síntesis electroquímica, síntesis por combustión.

## Introducción

El término puntos cuánticos se asocia principalmente con nanopartículas de diámetros menores a 10nm, típicamente a base de un metal y un no metal (comúnmente del grupo 15 o 16 de la tabla periódica), los cuales muestran propiedades ópticas distintas no solo de los materiales macroscópicos, si no también, de las correspondientes nanopartículas con tamaños mayores a 10nm.

Los puntos cuánticos de carbono (CQDs, puntos C o CDs) son nuevos nanomateriales de carbono, este es un elemento cuantioso y no tóxico, por lo que su uso ha sido demasiado atractivo para diferentes usos aplicaciones a nivel tecnológico, medico, entre otros. Se han reportado varias técnicas para la síntesis de CDs, como pirolisis [1], carbonización de grupos de polímeros [2], ablación con láser [3], hidrotermal [4] y métodos electroquímicos [5], Combustión [6] entre otros, con el fin de obtener partículas carbonosas, amorfas o cristalinas con forma, tamaño y morfología diversas.

Las características más relevantes de los CQDs son sus morfologías casi esféricas con tamaños que varían hasta los 10nm, con núcleo de carbono amorfo o similar al grafito, que van a depender de la técnica de preparación y los materiales empleados; Además los CDQ han mostrado propiedades bastantes peculiares, como excelente fotoluminiscencia, excelente foto estabilidad, alta inercia química y buena dispersabilidad tanto en medios acuosos como orgánicos. Los CD han mostrado una gran popularidad en diversas áreas de investigación debido a su baja toxicidad, excelente compatibilidad y fácil modificación de la superficie, como se mencionaba anteriormente; Por estas características que los

destacan se han encontrado varias aplicaciones donde destacan por ejemplo imágenes in vivo, conversión de energía, fotocatalisis, administración de fármacos, así como detección fluorescente.

Como estructuras basadas en carbono, la elección de materiales para comenzar la preparación de CQD es muy amplia, incluidos compuestos orgánicos de origen natural, como pueden ser el grafito o el carbón vegetal, aunque también existen las fuentes renovables como residuos de biomasa, residuos agrícolas, forestales o subproductos, entre otros. Por lo que la producción de nanomateriales de alto valor, como puntos de carbono, a partir de estos recursos es que hay gran interés en la química sostenible y la economía circular.

Desde un punto de vista estructural, los CD se pueden clasificar en tres clases distintas: puntos cuánticos de grafito (GQD), puntos cuánticos de carbono (CQD) y puntos de polímero carbonizado (CPD).

Los métodos de preparación de CD más estudiados se basan en tratamientos solvotérmicos o asistidos por microondas de varias fuentes de carbono, tanto en enfoques ascendentes como en descendentes.

La síntesis de puntos cuánticos de carbono (CQDs) puede realizarse mediante diversos métodos, los cuales se dividen en dos enfoques principales: "bottom-up" y "top-down".

#### Síntesis "Bottom-Up"

La pirolisis es un proceso donde un material precursor se descompone a altas temperaturas en ausencia de oxígeno, dando lugar a la formación de nanopartículas de carbono. Este método es conocido por su simplicidad y potencial escalabilidad, lo que lo hace adecuado para la producción a gran escala. Durante la pirolisis, el precursor se somete a un calentamiento intenso, lo que provoca su descomposición en elementos más simples que se reorganizan para formar nanopartículas de carbono. Sin embargo, para obtener puntos cuánticos de carbono (CQDs) con propiedades específicas, es crucial controlar con precisión las condiciones de temperatura y el tiempo de proceso. Estas variables influyen en el tamaño, morfología y propiedades ópticas y electrónicas de las nanopartículas resultantes, haciendo que el ajuste fino de estos parámetros sea esencial para aplicaciones específicas.

La combustión es similar a la pirolisis, ya que también implica la descomposición térmica de un precursor, pero se diferencia por la presencia de oxígeno en el proceso. Este método puede ser más rápido y económico que la pirolisis, ya que la adición de oxígeno facilita la descomposición del precursor y la formación de nanopartículas. No obstante, la presencia de oxígeno requiere un control cuidadoso para evitar la oxidación completa del carbono a dióxido de carbono, lo cual puede destruir el material deseado. La combustión, al igual que la pirolisis, necesita un ajuste preciso de las condiciones de proceso para optimizar la formación de CQDs y prevenir la degradación del material.

Ambos métodos, pirolisis y combustión, son ejemplos de la síntesis "bottom-up", donde se ensamblan átomos o moléculas para formar estructuras más grandes y complejas. Este enfoque permite un control más detallado sobre las propiedades finales del material, ya que las condiciones de síntesis determinan directamente la estructura y funcionalidad de las nanopartículas formadas. La síntesis "bottom-up" es especialmente valiosa en la nanotecnología y la fabricación de materiales avanzados, ya que permite la creación de materiales con características específicas y propiedades mejoradas para una amplia gama de aplicaciones tecnológicas.

#### Síntesis "Top-Down"

La electroquímica puede ser una técnica poderosa para estos propósitos, permitiendo reacciones redox heterogéneas en las cuales el potencial se puede modular fácilmente entre dos electrodos y el monitoreo de la corriente que pasa en la celda electrolítica podría funcionar como indicador de algunas de las propiedades de los puntos cuánticos de carbono (CQDs). Esta capacidad de ajustar y medir con precisión las condiciones electroquímicas hace que la electroquímica sea una herramienta versátil y efectiva para la caracterización y modificación de materiales a escala nanométrica.

Por lo tanto, la aplicación de la electroquímica como técnica de síntesis, intrínsecamente verde, así como la investigación de las actividades electrocatalíticas de los CQDs, ha sido intensamente estudiada en los últimos años. La naturaleza verde de la electroquímica se debe a que generalmente no requiere reactivos químicos adicionales que puedan ser tóxicos o difíciles de manejar, haciendo del proceso una opción más segura y amigable con el medio ambiente. Además, los CQDs sintetizados electroquímicamente han mostrado potencial en una variedad de aplicaciones, desde sensores hasta catalizadores y dispositivos de almacenamiento de energía, debido a sus propiedades únicas derivadas del proceso de síntesis.

La síntesis electroquímica implica la aplicación de corrientes eléctricas para disolver un material de carbono macroscópico, como el grafito, en un medio electrolítico, produciendo nanopartículas de carbono. Este enfoque "top-

down" descompone materiales más grandes en CQDs, permitiendo un control fino sobre el tamaño y la funcionalización de las partículas mediante la variación de los parámetros electroquímicos.

### Clasificación de los puntos cuánticos del carbono.

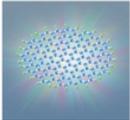
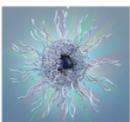
Clasificación	Nombre completo	Características	Tamaño	Estructura	Propiedades ópticas	Aplicaciones
GQDs	Graphene Quantum Dots (Puntos cuánticos de grafeno)	Poseen fragmentos pequeños de grafeno con grupos químicos en los bordes, defectos en las intercapas, además son anisotrópicos.	<20 nm (dimensiones laterales) <2.5 nm (altura)		Tienen efecto de confinamiento cuántico, efectos de borde y centros de fluorescencia debido a dominios $\pi$ -conjugados.	Son utilizados en biosensores, imágenes biomédicas, y catálisis.
CQDs	Carbon Quantum Dots (Puntos cuánticos de carbono)	Son esféricos, con redes cristalinas evidentes y grupos químicos en la superficie.	<10 nm		Luminescencia intrínseca y efecto de confinamiento cuántico.	Requeridos en fotónica y sensores.
CNDs	Carbon NanoDots (Nanopuntos de carbono)	Alto grado de carbonización, no tienen redes cristalinas evidentes y poseen algunas características de polímero.	<10 nm		Luminescencia originada por defectos de superficie y subdominio, no tienen efecto de confinamiento cuántico.	Bioimágenes y fotocatalisis.
CPDs	Carbonized Polymer Dots (Puntos de polímero carbonizado)	Estructura híbrida polímero/carbono, con grupos funcionales y cadenas de polímero en la superficie, el núcleo de carbono puede tener cuatro subclases.	<10 nm		Luminescencia originada de estado superficial, estado de subdominio y efecto de emisión mejorado por entrecruzamiento (CEE)	Liberación de fármacos y optoelectrónica

Figura 1. Tabla de clasificación de los puntos cuánticos del Carbono

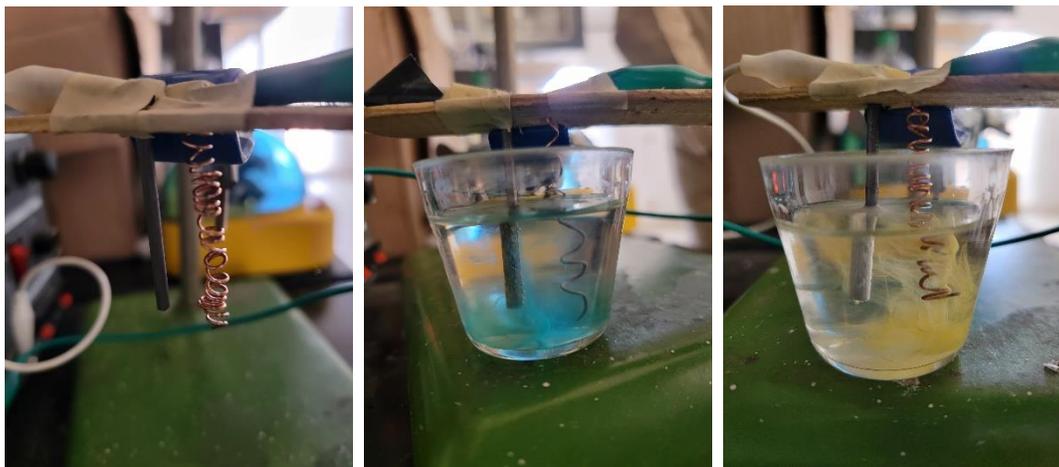
## Experimental

### Síntesis.

Las síntesis de puntos cuánticos de carbono que se desarrollaron para este trabajo son dos; una síntesis de arriba hacia abajo (Top-Down) y otra de abajo hacia arriba (Bottom-Up). Esto con la finalidad de evaluar y comparar estos dos métodos en aspectos como, tiempo de síntesis, costo de síntesis y resultados.

#### De arriba hacia abajo.

La síntesis electroquímica se llevó a cabo con tres electrolitos diferentes; Nitrato de potasio,  $\text{KNO}_3$ , (3M), Cloruro de Potasio,  $\text{KCl}$ , (3M) y Buffer de fosfatos, PBS,  $\text{pH} = 7$ . Para esta síntesis se utilizó como ánodo una barra de grafito, y como cátodo, cobre y/o barras de grafito. Se estudiaron distintos parámetros como la distancia entre electrodos y la intensidad de corriente eléctrica aplicada al sistema.



*Figuras 2. Síntesis de PCC por método electroquímico*

### De abajo hacia arriba

Para este segundo método se llevó a cabo la síntesis de CQDs a partir de la combustión de una vela sin aroma. Para este método, se colocó alrededor de una pinza de tres dedos fijada a un soporte universal, una hoja de aluminio que estuvo en contacto con la llama de la vela sin aroma. De la hoja de aluminio se recuperaron 25mg del hollín que se produjo de la combustión de la vela. Una vez recuperados los 25mg de hollín, se montó un sistema de reflujo con un matraz de fondo plano, un condensador y una mini bomba sumergible. Para oxidar las partículas de carbono del hollín con una solución ácida.



*Figura 3. Síntesis de PCC por método de combustión*

Para la realización de las tintas conductoras anteriormente se realizaron los electrodos de trabajo en un vidrio tipo ITO, comenzando por las soluciones antes mencionadas, se tomaron 25ml de cada una, estas fueron colocadas en un vaso y se mezclaron, por consiguiente, con ayuda de un multímetro se verificó su lado conductor de los vidrios y con una pipeta se hizo un barrido del lado conductor en la mitad de los cristales, para dejarlas secar y ser utilizadas.

### Preparación de tintas conductoras

En este estudio, se utilizó un potenciostato galvanostato de la marca *Biologic SP-150*. El sistema se configuró conectando tres diferentes electrodos con cables tipo caimán: el electrodo de trabajo (WE), compuesto de vidrio tipo ITO; el electrodo de referencia (RE), un electrodo de calomelanos que proporciona un potencial constante; y el electrodo auxiliar (CE), que en este caso era de grafito. Adicionalmente, se utilizó un contraelectrodo de platino.

Una vez ensamblados, los diferentes electrodos se sumergieron en una solución electrolítica tipo buffer de fosfato, con un volumen de 10 ml y un pH de 7.4.

Para la obtención de datos, se utilizó el programa EC-Lab, se empleó la técnica de espectroscopia de impedancia electroquímica, para la evaluación de las propiedades conductoras y de generación de fotocorriente de los materiales obtenidos, dichas pruebas se hicieron con iluminación normal y con ayuda de una lámpara UV.

## **(EIS)**

La espectroscopía de impedancia, EIS, por sus siglas en inglés, es un análisis cualitativo y cuantitativo de nuestro sistema que nos ofrece información mecánica y cinética de nuestro sistema. Es ampliamente usado en estudios de corrosión, ciencia de semiconductores, conversión de energía, tecnologías de almacenamiento y para diagnósticos no invasivos para sensores químicos y biosensores [20A]. La espectroscopia electroquímica de impedancia (EIS), también nos permite observar distintos fenómenos electroquímicos que ocurren en nuestro sistema, con la particularidad de que, aunque, estos fenómenos ocurren en una frecuencia característica, podemos verlos en una sola gráfica. Es esta última característica la que hace a la EIS un estudio completo y complejo de un sistema electroquímico.

De manera muy amplia, la espectroscopía de impedancia funciona de la siguiente manera: Un potenciostato aplicará una señal senoidal al sistema electroquímico, después esta señal pasará a través del sistema, nos arrojará una señal de corriente senoidal de salida y la relación entre el potencial aplicado en la entrada y la corriente de salida será la impedancia del sistema, que es todo aquello que ralentiza o impide el paso de corriente a través de nuestro sistema electroquímico.

## **Gráfica de Nyquist**

La gráfica de Nyquist es una herramienta que nos permite observar de manera gráfica los fenómenos electroquímicos que ocurren en nuestro sistema, todo esto en un plano cartesiano, donde la abscisa será la impedancia real del sistema y la ordenada al origen será la impedancia imaginaria del sistema.

Esta gráfica se debe graficar con una relación 1:1 para las escalas de los ejes, de tal manera que obtengamos un gráfico cuadrado, el cual, en la primera parte, antes del primer corte en el eje de las abscisas nos dará información sobre la resistencia de la solución (electrolito)

## **Mediciones ópticas**

### **Análisis bajo luz UV**

Como se ha mencionado en este artículo, una de las características por las cuales los puntos cuánticos de carbono, CQDs, son de gran interés actualmente es debido a sus propiedades ópticas que les confiere el confinamiento cuántico, esto es que los PCC absorben energía para después emitirla, proceso al que llamamos luminiscencia. Es por eso, que se expusieron las muestras de todas las síntesis ante la luz UV para observar si presentaban luminiscencia

### **Efecto Tyndall**

Para comprobar de otra manera óptica la presencia de nanopartículas en nuestras soluciones resultantes de las diferentes síntesis, se llevó a cabo la prueba del efecto Tyndall. Este método se puede describir como la dispersión de la luz en un medio por el efecto, en este caso, de las nanopartículas presentes en un medio.

De tal manera que, con la ayuda de un láser, este se hizo pasar a través de las muestras de cada una de las síntesis realizadas.



## Resultados y Discusión

A continuación, se presentan las muestras con mejores resultados en cada parámetro evaluado.



Figura 4. Líquido sobrenadante resultante de la síntesis por combustión (Abajo-Arriba), la cual se oxidó por 18hrs.

En la figura 4, podemos ver una foto del líquido sobrenadante con el característico color café amarillento. Esta síntesis se realizó por 18 horas y fue la mejor, ya que, presentaba el color café amarillento que se reporta en varios artículos, en comparación a las otras muestras que presentaban un color gris oscuro y no presentaban un efecto luminiscente tan evidente cuando se exponían ante la lámpara de luz UV en comparación al de la oxidación por 18 horas.



Figura 5. Líquido sobrenadante resultante de la síntesis por combustión (Abajo-Arriba), la cual se oxidó por 18 hrs, expuesto a la luz UV

En la figura 5, se muestra el líquido sobrenadante expuesto ante la luz UV. Como se puede apreciar, el cambio de color es evidente en comparación con la muestra de la figura 1, esto nos indica que seguramente existe PCC en nuestra síntesis, lo que genera este efecto luminoso.



Figura 6. Muestra PBS-DMSO. Síntesis electroquímica

En la figura 6, se muestra la muestra que presentó un mejor resultado ante la prueba del efecto Tyndall. Una de estas fue la muestra que se obtuvo por síntesis electroquímica o de arriba hacia abajo, como se puede ver el trayecto del láser a través de la solución, en comparación con otros donde solo se apreciaban algunos puntos y el trayecto se cortaba. A esta muestra se le agregó un disolvente, que fue el dimetilsulfóxido (DMSO)



Figura 7. Muestra de síntesis de PCC por combustión, 18hrs, DMSO

La segunda muestra evaluada ópticamente bajo el efecto Tyndall que presentó mejores resultados en comparación con las demás muestras que se sintetizaron por el método de combustión, fue la que se óxido por 18 horas y se le agregó dimetilsulfóxido (DMSO) como disolvente para mejorar los efectos ópticos de la muestra.

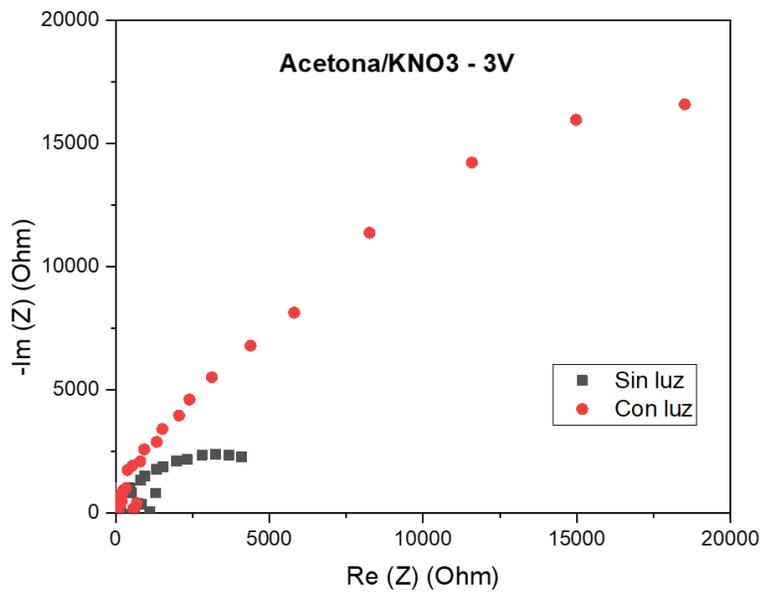


Figura 8. Gráfica prueba acetona KNO3 3V

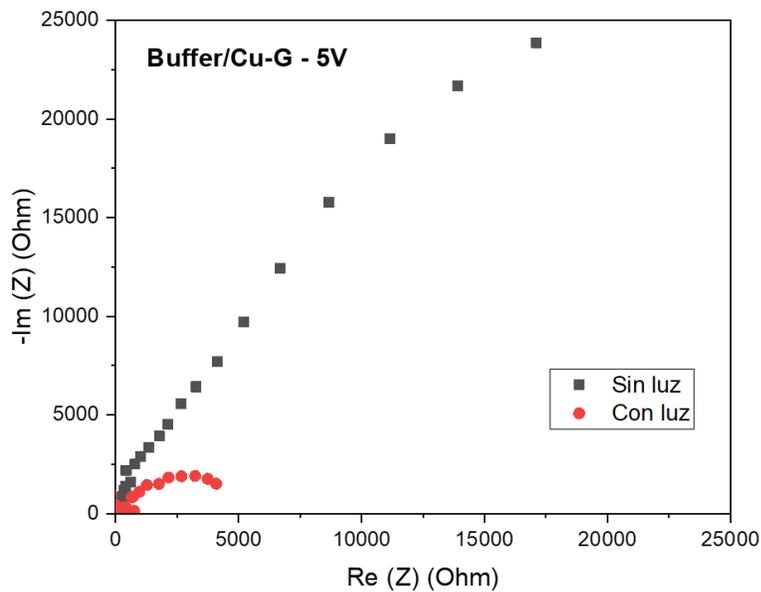


Figura 9. Gráfica prueba buffer 5V Cu-Grafito

En ausencia de luz UV, la menor altura de la curva en la gráfica sugiere una mayor impedancia, indicando una resistencia elevada a la transferencia de electrones. Esto implica una menor actividad electroquímica de los materiales sin la

excitación de la luz UV, reduciendo su capacidad de transferencia electrónica. Por otro lado, al tener exposición de la luz UV mejora significativamente la conductividad del material. La forma y la posición de esta curva indican una mayor actividad electroquímica y una mejor transferencia de electrones (figura 8). Por otra parte, es el caso contrario para la figura 9, donde se puede observar que con ausencia de luz presenta una menor impedancia y mayor actividad electroquímica.

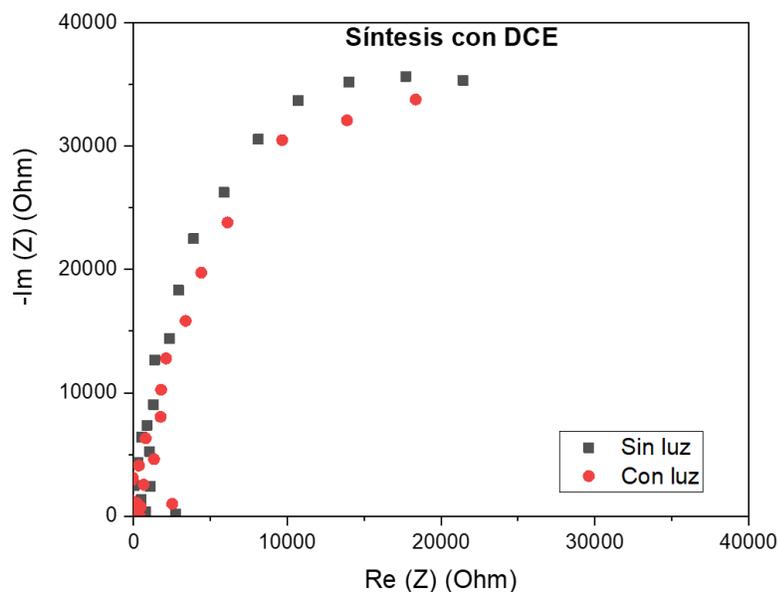


Figura 10. Gráfica de prueba síntesis con DCE

En el caso de la figura 10, la similitud en las alturas de ambas curvas indica que la impedancia del sistema tiende a ser la misma tanto con luz UV como sin ella. También, indica que la respuesta electroquímica del material no cambia significativamente con la exposición a la luz UV, es decir, tiene una respuesta electroquímica relativamente estable y no es fuertemente foto conductivo.

## Conclusiones

Los métodos para obtener CDQs mediante síntesis electroquímica (Arriba hacia abajo) y combustión (Abajo hacia arriba) son una alternativa viable frente a otros métodos con equipo más sofisticado, un mayor tiempo de síntesis y reactivos costosos. Por ejemplo, el tiempo promedio para la síntesis electroquímica, desde la producción de puntos cuánticos, hasta la formación de tintas tarda en promedio 90 minutos. Por otro lado, está la síntesis por combustión, a pesar de que, la que mostró mejores resultados fue la oxidación por 18 horas, la síntesis es sencilla de replicar. Además, es posible obtener mejores resultados en la síntesis de 6 horas ajustando parámetros de síntesis, lo que podría hacer que obtuviéramos resultados similares en un menor tiempo.

En cuanto a los resultados, la síntesis por combustión mostró que el tiempo de oxidación de las nanopartículas es un factor importante en el rendimiento de la síntesis, pero hay otros factores como el pH de la solución y la temperatura de reacción que podrían modificarse para reducir el tiempo de oxidación y de la síntesis en general.

A pesar de estos hallazgos, nuestro estudio tiene ciertas limitaciones. Por ejemplo, la reproducibilidad del método de síntesis en escalas mayores y la uniformidad de los tamaños de los puntos cuánticos pueden requerir más optimización. Reconocer estas limitaciones es crucial para la interpretación precisa de los resultados y para orientar futuras investigaciones.

En resumen, este estudio contribuye al campo de los nanomateriales al presentar un método efectivo para la síntesis de puntos cuánticos de carbono con propiedades ópticas y electrónicas prometedoras. Esperamos que nuestros hallazgos y las futuras investigaciones basadas en ellos conduzcan a avances significativos en aplicaciones tecnológicas y biomédicas

## Agradecimientos

El grupo de trabajo agradece a la Dirección de Investigación y Apoyo al Posgrado y a Veranos UG por las becas otorgadas. Se agradece a LICAM por el apoyo en técnicas de caracterización

## Bibliografía/Referencias

- I. Kang, J.-W., Kim, J.-Y., & Kang, D.-H. (2023). Synthesis of carbon quantum dot synthesized using spent coffee ground as a biomass exhibiting visible-light-driven antimicrobial activity against foodborne pathogens. *Journal of Food Engineering*. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2023.111820
- II. Başlak, C., Öztürk, G., Demirel, S., Kocyigit, A., Doğu, S., & Yıldırım, M. (2023). Green synthesis of carbon quantum dots from *Sideritis vuralii* and its application in supercapacitors. *Inorganic Chemistry Communications*, 153, 110845.
- III. Rocco, D., Moldoveanu, V. G., Feroci, M., Bortolami, M., & Vetica, F. (2022). Electrochemical synthesis of carbon quantum dots. *ChemElectroChem*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1002/celec.202201104>
- IV. Sánchez González, J. del C. (2024). Síntesis y caracterización de puntos cuánticos de carbono para aplicaciones de interés biomédico y ambiental [Protocolo de tesis, Universidad de Guanajuato]. Dirigido por Araceli Jacobo Azuara y María del Rosario Galindo González. Universidad de Guanajuato.
- V. Wang, Y., Hu, A. (2014). Carbon quantum dots: synthesis, properties and applications. *Journal of Materials Chemistry C*, 2(34), 6921-6939. <https://doi.org/10.1039/C4TC00988F>
- VI. Baker, S. N., Baker, G. A. (2010). Luminescent Carbon Nanodots: Emergent Nanolights. *Angewandte Chemie International Edition*, 49(38), 6726-6744. <https://doi.org/10.1002/anie.200906623>
- VII. Li, H., Kang, Z., Liu, Y., Lee, S.-T. (2012). Carbon nanodots: synthesis, properties and applications. *Journal of Materials Chemistry*, 22(46), 24230-24253. <https://doi.org/10.1039/C2JM34690G>
- VIII. Bárcenas, J., Cardona, J., Escalante, O. A., Gutiérrez, F., Jacobo, F. A., Quiroz, E. A., & Galindo, R. (2023). Liberación de insulina por pulsos electroquímicos. *JÓVENES EN LA CIENCIA*, 21, 1–13. Recuperado a partir de <https://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/4021>
- IX. Lazanas, A. C., & Prodromidis, M. I. (2023). Electrochemical impedance spectroscopy— a tutorial. *ACS Measurement Science Au*, 3(3), 162-193.
- X. Ray, S. C., Saha, A., Jana, N. R., & Sarkar, R. (2009). Fluorescent carbon nanoparticles: synthesis, characterization, and bioimaging application. *The Journal of Physical Chemistry C*, 113(43), 18546-18551.
- XI. Shangshang Wang, Jianbo Zhang, OumaimaGharbi, Vincent Vivier, Ming Gao, et al.. Electrochemical impedance spectroscopy. *Nature Reviews Methods Primers*, 2021, 1, 41 (21p.). 10.1038/s43586-021 00039-w. hal-03258251

- XII. Tian, L., Ghosh, D., Chen, W., Pradhan, S., Chang, X., & Chen, S. (2009). Nanosized carbon particles from natural gas soot. *Chemistry of materials*, 21(13), 2803-2809.
- XIII. Nallayagari, A. R., Sgreccia, E., Pizzoferrato, R., Cabibbo, M., Kaciulis, S., Bolli, E., ... & Di Vona, M. L. (2021). Tuneable properties of carbon quantum dots by different synthetic methods. *Journal of Nanostructure in Chemistry*, 1-16.
- XIV. Lillo-Rodenas, M. A. (2020). Nanomateriales que interaccionan con la luz.