

Residuos de café como precursores de nanopartículas de carbono verde Coffee waste as precursor for green carbon nanoparticles

D.L. Díaz-Santiago ^{a,*}, O.G. Rojas-Valencia ^b, J.L. Casas-Espínola ^a, M. Estrada-Flores ^b,
C.M. Reza-San German ^b

^a Instituto Politécnico Nacional, UPIITA, C.P. 07340, Alcaldía Gustavo A. Madero, Ciudad de México.

^b Instituto Politécnico Nacional, ESIQIE-UPALM, CP 07738, Alcaldía Gustavo A. Madero, Ciudad de México.

Resumen

La acumulación de residuos orgánicos de la industria cafetalera, como la pulpa de café, representa un problema ambiental debido a su manejo inadecuado. Este trabajo propone una ruta de síntesis verde para obtener nanopartículas de carbono luminiscentes a partir de dicho residuo mediante carbonización asistida por mufla en atmósfera de aire. El proceso se realizó sin reactivos tóxicos, catalizadores ni agentes oxidantes, empleando únicamente agua como medio dispersante, lo que reduce su impacto ambiental. Se prepararon cuatro muestras bajo distintas condiciones de síntesis y se caracterizaron mediante espectroscopía UV-Vis, PL y FT-IR. Los espectros de fotoluminiscencia mostraron emisiones a 435 y 455 nm bajo excitación de 325 nm, con un corrimiento red-shift respecto a la banda de absorción en 271 nm, común en nanopartículas de carbono. El análisis FT-IR evidenció grupos funcionales oxigenados relacionados con la estructura superficial y el comportamiento óptico de las nanopartículas obtenidas.

Palabras Clave: Biomasa, desechos agroindustriales, fotoluminiscencia, nanopartículas.

Abstract

The accumulation of organic waste from the coffee industry, such as coffee pulp, represents an environmental problem due to its inadequate management. This work proposes a green synthesis route to obtain luminescent carbon nanoparticles from this residue through muffle-assisted carbonization in an air atmosphere. The process was carried out without toxic reagents, catalysts, or oxidizing agents, using only water as the dispersing medium, thereby reducing its environmental impact. Four samples were prepared under different synthesis conditions and characterized using UV-Vis, PL, and FT-IR spectroscopy. The photoluminescence spectra showed emissions at 435 and 455 nm under 325 nm excitation, exhibiting a red-shift relative to the absorption band at 271 nm, which is typical for carbon nanoparticles. FT-IR analysis revealed oxygen-containing functional groups associated with the surface structure and optical behavior of the synthesized nanoparticles.

Keywords: Biomass, agro-industrial waste, photoluminescence, nanoparticles.

1. Introducción

Los nanomateriales a base de carbono han cobrado gran relevancia debido a sus excepcionales propiedades fisicoquímicas, como buena conductividad eléctrica y térmica, baja toxicidad y biocompatibilidad, lo que los hace valiosos en áreas como energía, biomedicina y remediación ambiental (Baig *et al.*, 2021, Nasir *et al.*, 2018). Además, su versatilidad estructural, como nanotubos, puntos cuánticos, grafeno, fibras, etc., les permite adaptarse a múltiples aplicaciones (Siqueira and Oliveira, 2018). En particular, las nanopartículas de carbono de algunos nanómetros se distinguen por sus

propiedades luminiscentes y estabilidad química, lo cual da un panorama prometedor para aplicaciones en bioimagen, sensores ópticos, fotocátalisis y degradación de contaminantes (Zia *et al.*, 2021).

Existen diferentes enfoques para la obtención de nanomateriales, sin embargo, los métodos convencionales requieren de equipo sofisticado, precursores no renovables o condiciones de síntesis muy duras o complejas, estas limitaciones no solo aumentan los costos de producción, sino que también generan un impacto medioambiental considerable, lo que restringe su escalabilidad y la sostenibilidad. Debido a esto surge la síntesis verde de

*Autor para la correspondencia: ddiazs1700@alumno.ipn.mx

Correo electrónico: ddiazs1700@alumno.ipn.mx (Diana Laura Díaz-Santiago), ogrojas@ipn.mx (Oscar Guadalupe Rojas-Valencia), jcasase@ipn.mx (José Luis Casas-Espínola), mestradaf0400@ipn.mx (Miriam Estrada-Flores), creza@ipn.mx (Carmen Magdalena Reza-San-Germán).

nanomateriales como alternativa para minimizar el impacto ambiental empleando rutas más limpias y el uso de precursores renovables, como los residuos orgánicos. Algunos de estos residuos son ricos en carbono y contienen compuestos como celulosa, hemicelulosa, lignina y varios grupos funcionales que contienen oxígeno, lo que los hace atractivos como precursores para una síntesis más ecológica. El uso de biomasa como fuente de carbono es importante ya que reduce el uso de sustancias nocivas y aporta una ruta sostenible para la producción de materiales avanzados (Noah and Ndangili, 2022).

Cada año la agroindustria genera más de 500 millones de toneladas de residuos a nivel global, cuya acumulación sin un tratamiento adecuado produce un fuerte impacto ambiental negativo como emisiones de gases de efecto invernadero, contaminación de suelo y agua, y pérdida de biodiversidad (Singh *et al.*, 2021). Aprovechar estos residuos para producir biocombustibles o materiales funcionales, representa una oportunidad tanto ambiental como económica. Un ejemplo de esto son los residuos del cultivo y consumo de café, incluyendo pulpa, cáscara y mucilago, que representan una porción significativa de los desechos generados por la industria cafetalera. Se estima que hasta dos tercios del volumen total del café producido termina como residuos, lo cual genera un problema ambiental y social importante, ya que, sin un tratamiento adecuado contribuyen a la contaminación de cuerpos de agua y degradación de suelo, por lo que es importante su revalorización siguiendo los principios de la economía circular (Serna-Jiménez *et al.*, 2022, Tsigkou *et al.*, 2025).

Diversos estudios han demostrado la viabilidad de obtener nanomateriales de carbono a partir de residuos orgánicos mediante tratamientos térmicos como la pirólisis. Por ejemplo, Ma *et al.* (2019) sintetizaron nanopartículas de carbono a partir de ácido cítrico mediante pirólisis controlada, mientras que Manikandan y Lee (2022) recopilan múltiples investigaciones en las que se obtienen puntos cuánticos de carbono empleando biomasa residual bajo métodos verdes similares. Estos trabajos confirman que la conversión térmica de materia orgánica rica en carbono puede generar materiales con propiedades ópticas y estructurales comparables a los producidos con precursores refinados, lo que refuerza el potencial de la biomasa como fuente sostenible para la producción de materiales funcionales, pero con menores costos y mayor potencial de escalabilidad (Daulay *et al.*, 2024, Noah and Ndangili, 2022).

En este contexto, el presente trabajo busca plantear una estrategia sostenible para la síntesis de nanopartículas de carbono a partir de pulpa de café, un subproducto abundante de la industria cafetalera. El método se basa en un proceso de carbonización asistida en mufla, utilizando agua como medio de dispersión y sin la incorporación de reactivos químicos adicionales. De forma específica, se desea establecer las condiciones de carbonización adecuadas para la obtención de nanopartículas; caracterizar sus propiedades estructurales y ópticas mediante espectroscopía UV-Vis, PL y FT-IR; y analizar la relación entre los grupos funcionales superficiales y el comportamiento fotoluminiscente observado. Se plantea que la pulpa de café, por su composición rica en carbono y oxígeno, puede actuar como precursor adecuado para producir nanopartículas de carbono con propiedades luminiscentes, sin necesidad de reactivos tóxicos ni pasos adicionales de funcionalización superficial. Este enfoque representa una

alternativa innovadora para el aprovechamiento de residuos orgánicos, transformando un problema ambiental en una oportunidad tecnológica, permitiendo la generación de materiales avanzados de manera accesible, de bajo costo y con un mayor compromiso ambiental y social.

2. Metodología

2.1 Síntesis

La pulpa de café se obtuvo en base húmeda en un beneficio de café ubicado en el estado de Oaxaca. Con el fin de disminuir el consumo energético, fue deshidratada bajo luz solar durante dos semanas, para eliminar la mayor cantidad de humedad presente. De la materia deshidratada se tomaron porciones de 10 g y se carbonizaron en una mufla a 200°C en intervalos de 1h (B1), 2h (B2), 3h (B3) y 4h (B4). La elección de 200 °C como temperatura de síntesis se basó en reportes previos sobre carbonización de biomasa, donde este rango térmico permite deshidratar y descomponer de forma parcial compuestos orgánicos. De esta manera, se favorece la formación de estructuras grafíticas con grupos funcionales oxigenados que contribuyen a la fotoluminiscencia. Los intervalos de tiempo de 1 a 4 horas se establecieron con el objetivo de evaluar el efecto del tiempo sobre el grado de carbonización y degradación de grupos funcionales superficiales, actuando como un proceso de optimización exploratoria de las condiciones de síntesis.

Después cada muestra se dejó enfriar a temperatura ambiente y se trituró en un mortero hasta obtener un polvo fino. Del polvo obtenido se tomaron muestras de 0.1 g y se dispersaron en aproximadamente 10 ml de agua destilada. Esta solución se agitó vigorosamente hasta obtener una solución homogénea y posteriormente se inició el proceso de filtración, primero con papel de 22 µm, después con una membrana de 0.24 µm y finalmente con un filtro de 0.1 µm (100 nm) garantizando así que el material obtenido se encuentra en el rango de los nanomateriales que van de 1 a 100 nm (Saleh, 2020).

2.2 Caracterización

Con el fin de conocer las propiedades y características del material obtenido se realizaron análisis por diferentes técnicas espectroscópicas.

2.2.1 Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR)

Las mediciones FT-IR se realizaron con un espectrómetro Spectrum Two FT-IR marca Perkin Elmer con accesorio de reflectancia total atenuada (ATR), el análisis se realizó en un intervalo de 4000 a 450 cm⁻¹ para la identificación de los grupos funcionales presentes en la superficie de las nanopartículas.

2.2.2 Espectroscopia ultravioleta-visible (UV-Vis)

El análisis UV-Vis se realizó a través de un espectrómetro Lambda 365 marca Perkin Elmer, para conocer la longitud de onda de absorción del material obtenido.

2.2.3 Espectroscopia de fotoluminiscencia (PL)

Para determinar la longitud de onda de emisión de las nanopartículas de carbono obtenidas se utilizó como detector un tubo fotomultiplicador Hamamatsu modelo R493-02 y las muestras se excitaron con una lámpara de He-Cd a 254 nm con una potencia de 40 mW.

3. Resultados

Por el medio filtrante utilizado, cuyo diámetro fue de 0.1 μm (100 nm), se tiene la certeza que las partículas de carbono obtenidas tienen un tamaño nanométrico. No se realizaron mediciones directas del tamaño ni de la morfología de las nanopartículas mediante técnicas como TEM o DLS debido a la falta de disponibilidad de estos equipos durante la etapa experimental. No obstante, estas técnicas se consideran esenciales para corroborar de manera cuantitativa las dimensiones y la distribución de tamaño de los materiales sintetizados, por lo que se han propuesto como parte del trabajo futuro para fortalecer la caracterización estructural.

Las partículas fueron caracterizadas por distintas técnicas espectroscópicas que permitieron conocer sus propiedades ópticas.

3.1 Espectroscopia FT-IR

El análisis FT-IR (Figura 1) de las muestras obtenidas revela una composición química compleja y diversa. La banda ubicada alrededor de 3300 cm^{-1} corresponde a las vibraciones de estiramiento de los grupos $-\text{OH}$, asociados a humedad residual. En la región cercana a 2895 cm^{-1} se observa una señal atribuida a vibraciones de estiramiento $\text{C}-\text{H}$, relacionada con la presencia de cafeína. El pico en torno a 2300 cm^{-1} se relaciona con carbohidratos y ácidos clorogénicos, compuestos presentes en los desechos de café. La región comprendida entre 1650 y 1600 cm^{-1} presenta bandas propias de enlaces $\text{C}=\text{C}$ aromáticos, al igual que señales que pertenecen a la huella espectral de la cafeína. El pico alrededor de 1700 cm^{-1} corresponde a vibraciones de estiramiento $\text{C}=\text{O}$, asociadas con grupos acetilo y éster, característicos de pectinas y lignina. En

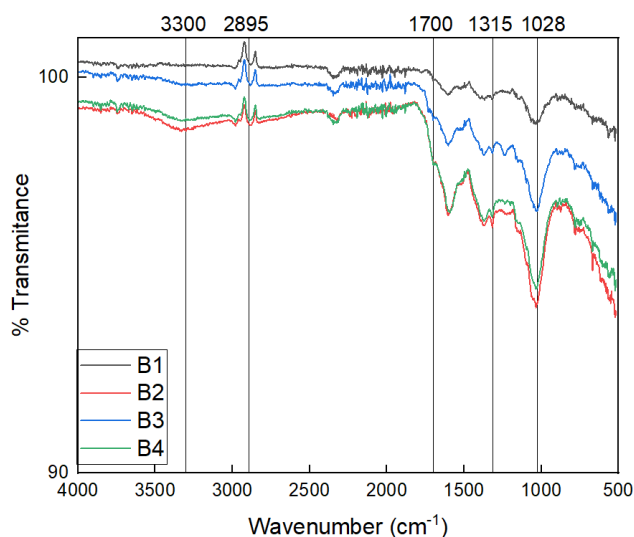


Figura 1. Espectros FT-IR de las muestras obtenidas.

la región de 1450 a 1000 cm^{-1} se identifican bandas asociadas a ácidos clorogénicos y otros ésteres, así como a vibraciones $\text{C}-\text{O}$ y $\text{C}-\text{O}-\text{C}$, que indican la presencia de carbohidratos como la sacarosa. Finalmente, el intervalo de 1500 y 700 cm^{-1} está dominado por vibraciones de grupos $\text{C}-\text{H}$, además de contribuciones derivadas de carbohidratos (Barrios-Rodríguez *et al.*, 2021).

En general el análisis FT-IR confirma que las muestras están compuestas principalmente por carbohidratos (sacarosa y celulosa), lignina, cafeína, así como pectinas y ácidos clorogénicos. Estos resultados coinciden con lo reportado en investigaciones previas, donde se han identificado bandas similares asociadas a estos grupos funcionales, lo cual respalda la presencia de dichos compuestos en los residuos de café y evidencia la conservación parcial de componentes estructurales clave para las propiedades ópticas del material obtenido (Barrios-Rodríguez *et al.*, 2021).

3.2 Espectroscopia UV-Vis

Los espectros UV-Vis (Figura 2) presentan dos bandas de absorción. En la literatura sobre nanoestructuras de carbono se reportan bandas características, una entre 220 – 270 nm , asociadas a transiciones $\pi \rightarrow \pi^*$ de dominios aromáticos y otra en la región de 280 – 350 nm atribuida a transiciones $n \rightarrow \pi^*$ de grupos funcionales oxigenados, dependiendo del tipo específico de nanopartícula (Balanta *et al.* 2023).

En este caso la primera señal, localizada a 271 nm , se asocia con transiciones electrónicas $\pi \rightarrow \pi^*$ características de

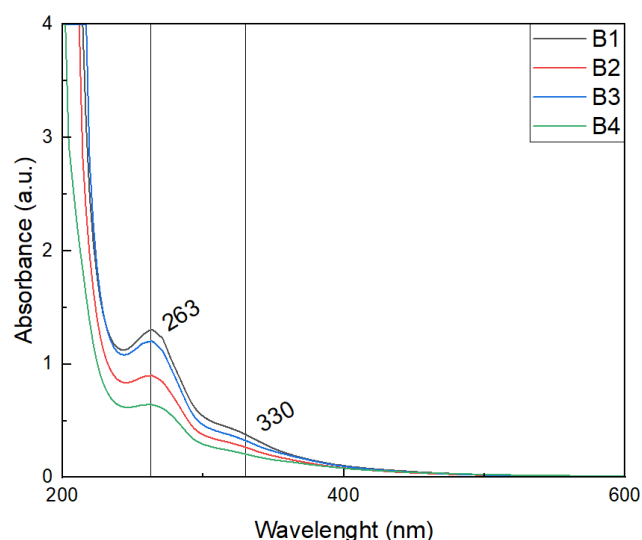


Figura 2. Espectros UV-Vis de las nanopartículas de carbono sintetizadas.

los enlaces $\text{C}=\text{C}$, aunque también es importante señalar que esta señal podría estar parcialmente influenciada por compuestos orgánicos residuales presentes en la pulpa de café, como la cafeína (Souto *et al.* 2021). Mientras que la segunda banda de absorción puede atribuirse a transiciones $n \rightarrow \pi^*$ de enlaces $\text{C}=\text{O}$ presentes en grupos funcionales como ésteres y carboxilatos, lo que resalta su contribución a las propiedades ópticas del material.

La presencia de estas bandas indica que parte de los constituyentes orgánicos de la biomasa inicial se conservan parcialmente durante el proceso de síntesis, contribuyendo así al comportamiento óptico del material.

3.3 Espectroscopia PL

Los espectros de fotoluminiscencia (Figura 3) presentan dos picos de emisión principales centrados en 435 nm y 455 nm bajo excitación de 325 nm, ambos con un corrimiento hacia el rojo respecto a las bandas de absorción (271 nm). Este desplazamiento se asocia con la relajación de los electrones excitados hacia estados de menor energía antes de la emisión de fotones y también sugiere la presencia de estados superficiales asociados a grupos funcionales oxigenados, que actúan como centros de captura de electrones, un comportamiento característico en materiales luminiscentes, particularmente en nanopartículas de carbono como el nanografito (Yan *et al.*, 2019, Zhu *et al.*, 2019).

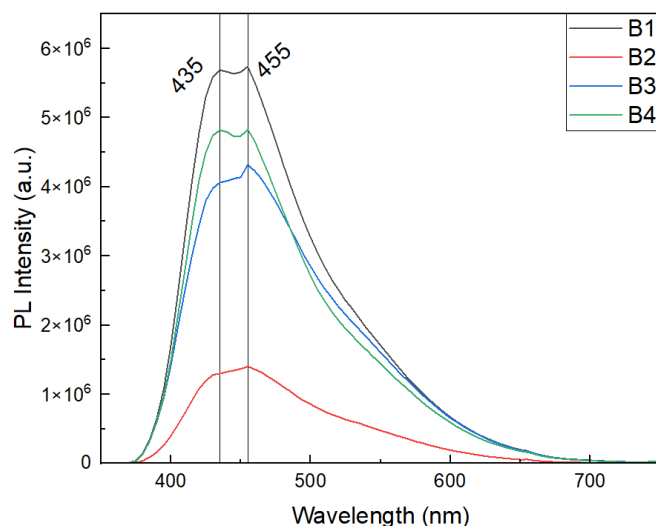


Figura 3. Espectros PL de las nanopartículas de carbono.

La presencia e intensidad de fotoluminiscencia indican confinamiento cuántico y una pasivación superficial efectiva. Estas propiedades ópticas confieren a los materiales un alto potencial para aplicaciones en detección de contaminantes y en procesos fotocatalíticos (Wang & Hu, 2014). En sensores ópticos, la sensibilidad de la emisión ante cambios en el entorno químico permitiría detectar iones metálicos o compuestos orgánicos por mecanismos de extinción de fotoluminiscencia o desplazamiento espectral. En fotocatalisis, la capacidad de absorber y emitir en la región visible favorece la transferencia de carga y la activación de reacciones bajo luz solar, lo que podría aprovecharse en la degradación de contaminantes (Wang & Hu, 2014). De esta forma, las propiedades ópticas observadas respaldan la viabilidad de emplear estos nanomateriales en aplicaciones ambientales.

4. Conclusiones

En este trabajo se consiguió convertir residuos de café en nanopartículas de carbono luminiscentes mediante un proceso simple de carbonización asistida en mufla en atmósfera de aire. Las nanopartículas obtenidas conservaron parcialmente grupos funcionales derivados de compuestos bioactivos, confirmados por FT-IR, los cuales desempeñan un papel importante en la pasivación superficial y en su comportamiento fotoluminiscente. Además, se encontró que condiciones moderadas de síntesis son suficientes para alcanzar

propiedades ópticas deseables, lo que resalta la eficiencia energética del método.

Esta investigación demuestra que los residuos agroindustriales pueden ser valorizados en materiales avanzados mediante un enfoque ambientalmente amigable, rentable y escalable. Las nanopartículas de carbono luminiscentes obtenidas podrían ser utilizadas en detección de contaminantes, sensores ópticos y fotocatalisis, contribuyendo al desarrollo de tecnología accesible y sostenible.

Referencias

- Baig, N., Kammakam, I., & Falath, W. (2021). Nanomaterials: a review of synthesis methods, properties, recent progress, and challenges. *Material Advances*, 2(6), 1821–1871. <https://doi.org/10.1039/d0ma00807a>
- Balanta, M. A. G., da Silva Filho, W. J. F., Souza, M. C. G., de Assunção, R. M. N., Champi, A., & Cuevas, R. F. (2023). Deconvolution of photoluminescence spectra and electronic transition in carbon dots nanoparticles from microcrystalline cellulose. *Journal of Luminescence*, 255. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2022.119607>
- Barrios-Rodríguez, Y., Collazos-Escobar, G. A., & Gutiérrez-Guzmán, N. (2021). ATR-FTIR for Characterizing and Differentiating Dried and Ground Coffee Cherry Pulp of Different Varieties (*Coffea Arabica* L.). *Engenharia Agricola*, 41(1), 70–77. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v41n1p70-77/2021>
- Daulay, A., Nasution, L. H., Huda, M., Amin, M., Nikmatullah, M., Supiyani, & Yusmiati. (2024). Green sources for carbon dots synthesis in sensing for food application – A review. *Biosensors and Bioelectronics: X*, 17. <https://doi.org/10.1016/j.biosx.2024.100460>
- Ma, C., Yin, C., Fan, Y., Yang, X., & Zhou, X. (2019). Highly efficient synthesis of N-doped carbon dots with excellent stability through pyrolysis method. *Journal of Materials Science*, 54(13), 9372–9384. <https://doi.org/10.1007/s10853-019-03585-7>
- Manikandan, V., & Lee, N. Y. (2022). Green synthesis of carbon quantum dots and their environmental applications. *Environmental Research*, 212. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113283>
- Nasir, S., Hussein, M. Z., Zainal, Z., & Yusof, N. A. (2018). Carbon-based nanomaterials/allotropes: A glimpse of their synthesis, properties and some applications. *Materials*, 11(295). <https://doi.org/10.3390/ma11020295>
- Noah, N. M., & Ndagili, P. M. (2022). Green synthesis of nanomaterials from sustainable materials for biosensors and drug delivery. *Sensors International*, 3, 100166. <https://doi.org/10.1016/j.sintl.2022.100166>
- Saleh, T. A. (2020). Nanomaterials: Classification, properties, and environmental toxicities. *Environmental Technology and Innovation*, 20, 101067. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101067>
- Serna-Jiménez, J. A., Siles, J. A., de los Ángeles Martín, M., & Chica, A. F. (2022). A Review on the Applications of Coffee Waste Derived from Primary Processing: Strategies for Revalorization. *Processes*, 10, 2346. <https://doi.org/10.3390/pr10112436>
- Singh, R., Das, R., Sangwan, S., Rohatgi, B., Khanam, R., Peera, S. K. P. G., Das, S., Lyngdoh, Y. A., Langyan, S., Shukla, A., Shrivastava, M., & Misra, S. (2021). Utilisation of agro-industrial waste for sustainable green production: a review. *Environmental Sustainability*, 4(4), 619–636. <https://doi.org/10.1007/s42398-021-00200-x>
- Siqueira, J. R., & Oliveira, O. N. (2017). Carbon-Based Nanomaterials. In *Nanostructures* (pp. 233–249). <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-49782-4/00009-7>
- Souto, U. T. C. P., Pontes, M. J. C., Silva, E. C., Galvão, R. K. H., Araújo, M. C. U., Sanches, F. A. C., Cunha, F. A. S., & Oliveira, M. S. R. (2010). UV-Vis spectrometric classification of coffees by SPA-LDA. *Food Chemistry*, 119(1), 368–371. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.05.078>
- Tsigkou, K., Demissie, B. A., Hashim, S., Ghofrani-Isfahani, P., Thomas, R., Mappinga, K. F., Kassahun, S. K., & Angelidaki, I. (2025). Coffee processing waste: Unlocking opportunities for sustainable development. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 210). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115263>
- 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>
- Yan, F., Sun, Z., Zhang, H., Sun, X., Jiang, Y., & Bai, Z. (2019). The fluorescence mechanism of carbon dots, and methods for tuning their emission color: a review. *Microchimica Acta*, 186(8). <https://doi.org/10.1007/s00604-019-3688-y>

- Zhu, P., Tan, K., Chen, Q., Xiong, J., & Gao, L. (2019). Origins of Efficient Multiemission Luminescence in Carbon Dots. *Chemistry of Materials*, 31, 4732–4742. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.9b00870>
- Zia, A. W., Birkett, M., Badshah, M. A., & Iqbal, M. (2021). Progress in-situ synthesis of graphitic carbon nanoparticles with physical vapour deposition. *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*, 67(3). <https://doi.org/10.1016/j.pcrysgrow.2021.100534>