

8. Utilización de residuos agrícolas de México para la síntesis sustentable de puntos cuánticos de carbono mediante métodos de química verde*

CLAUDIA LORENA COMPEÁN GONZÁLEZ¹RUBÉN AHUMADA-LAZO²DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.365.08>

Resumen

Este capítulo explora el uso innovador de los abundantes residuos agrícolas de México como precursores (biomasa) para la síntesis sustentable y escalable de puntos cuánticos de carbono (PCC) utilizando métodos de química verde. La utilización de residuos agrícolas no sólo aborda el apremiante problema de su gestión, sino que también proporciona una alternativa rentable y respetuosa con el medio ambiente para producir nanomateriales de alto valor. Al aprovechar los principios de la química verde, este enfoque minimiza el uso de sustancias peligrosas y reduce la huella medioambiental de los procesos de síntesis. Se analizan diversos residuos agrícolas, su composición química y su potencial en la producción de PCC. También se hace una reseña de los procesos de síntesis, las propiedades y las aplicaciones potenciales de los PCC, destacando su relevancia en electrónica, medicina, monitoreo y descontaminación ambiental. Por último, se abordan los retos que enfrenta la escalabilidad de los procesos de síntesis y se sugieren futuras líneas de investigación que permitan integrar prácticas sustentables en la síntesis de nanomateriales, contribuyendo a la economía circular y mejorando la cadena de valor de los residuos agrícolas en México.

* Capítulo derivado del proyecto UA-TEC Seed Fund "Sustainable and scalable synthesis of application-ready graphene quantum dots", financiado por University of Alberta y Tecnológico de Monterrey.

¹ Doctorante en Materiales. Catedrática en el Tecnológico de Monterrey, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2367-8450>

² Doctor en Física. Profesor en el Tecnológico de Monterrey, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1524-9576>

Palabras clave: *economía circular, residuos agrícolas, síntesis sustentable y escalable, nanomateriales.*

Introducción

Los puntos cuánticos (PC) han comenzado a popularizarse recientemente, gracias a su utilización para mejorar la calidad de la imagen en pantallas de televisión de las marcas líderes en el mercado y a que Moungi G. Bawendi, Louis E. Brus y Aleksey Yekimov fueron galardonados con el premio Nobel de química en 2023, por sus aportaciones para lograr la transición de la teoría a la práctica en el desarrollo de esa tecnología (Nevelius, 2023). Aunque hay algo de variación en los datos dependiendo de la fuente, el mercado mundial de los puntos cuánticos está dominado por una veintena de empresas a nivel global y se estimó en un valor cercano a los 6 billones de dólares en 2023, proyectando un crecimiento mayor a 5 840 millones a 2027, con una tasa de crecimiento anual compuesta (CAGR por sus siglas en inglés) del 16.34% (Technavio, 2023).

Los PC son nanopartículas tan pequeñas (menores a un par de decenas de nanómetros dependiendo del material), que sus propiedades ópticas y electrónicas están gobernadas por las leyes de la mecánica cuántica en lugar de las de la mecánica clásica o Newtoniana a la que estamos acostumbrados. Este fenómeno, conocido como confinamiento cuántico, surge de la discretización y separación de los niveles energéticos continuos conformados por los orbitales atómicos conforme se reduce el tamaño de los materiales. Esto permite seleccionar el color (energía o longitud de onda) de la luz que estas partículas pueden absorber y emitir por medio del control del tamaño de partícula durante el proceso de síntesis. Además, se puede controlar la química superficial de las nanopartículas, pasivando trampas energéticas generadas por defectos en la red cristalina del material (átomos faltantes, enlaces sueltos) con diferentes compuestos orgánicos e inorgánicos para aumentar la eficiencia cuántica, o agregando moléculas funcionalizantes que otorgan propiedades específicas. Gracias a estas características, los PC han sido explorados para el desarrollo de aplicaciones que van desde pantallas a gran escala o para dispositivos móviles, fotode-

tectores, celdas solares, emisores de luz cuántica a nano escala para fotones entrelazados, láseres de umbral cero y captura de bioimágenes. También abundan las aplicaciones químicas, como en el tratamiento de aguas residuales, almacenamiento de energía, detección de gases y en biomedicina. Sin embargo, durante el desarrollo generalizado de los últimos años han surgido varios problemas. En primer lugar, los PC suelen estar compuestos por elementos peligrosos para el medio ambiente, tóxicos para la salud y a menudo escasos (costosos), como el plomo, el arsénico, el indio y el cadmio. Muchos países, incluida toda la Unión Europea, cuentan con legislaciones que restringen el uso de estos elementos. Los primeros puntos cuánticos que se desarrollaron estaban compuestos de calcogenuros de cadmio, pero, debido a estas restricciones, se comenzó a buscar otras alternativas en familias de materiales como los calcogenuros de zinc, calcopirritas terciarias de cobre y plata o perovskitas de haluros (Ahumada-Lazo, 2019; Guan et al., 2023). Sin embargo, estos materiales siguen presentando algunos elementos escasos o tóxicos y aunque ha habido grandes progresos para sustituirlos por otros, aún existen varios retos en cuanto a eficiencia y estabilidad por resolver (Tamang, Wegner y Reiss, 2025). En segundo lugar, la síntesis puede ser un proceso laborioso y que requiere mucha energía, lo que dificulta su evolución a aplicaciones industriales. Además, las propiedades de los puntos cuánticos, y por lo tanto sus aplicaciones, dependen fuertemente del control de las condiciones de proceso. Entre los desafíos que enfrenta el mercado de los puntos cuánticos, se enlistan la poca disponibilidad de materias primas, el creciente uso de elementos tóxicos y metales pesados que dañan al medio ambiente y a la salud humana y los bajos rendimientos de producción (Technavio, 2023). La capacidad de sintetizar puntos cuánticos a partir de materiales abundantes y seguros, utilizando procesos que preserven o, incluso, mejoren sus propiedades cuánticas, y sean amigables con el medio ambiente, podría resolver estos problemas y conducir a una adopción a mayor escala de esta tecnología.

Puntos cuánticos de carbono (PCC) y grafeno (PCG)

Recientemente, los nanomateriales a base de carbono han despertado interés como posibles sustitutos o complemento a los nanomateriales metálicos o de semiconductores. Los puntos de carbono fluorescentes (Carbon Dots en inglés) fueron descubiertos por accidente durante el proceso de purificación de nanotubos de carbono preparados mediante descarga de arco (Xu et al., 2004) y suelen clasificarse en dos grupos principales: puntos cuánticos de carbono (PCC) y de grafeno (PCG). Los PCG tienen forma circular o elíptica, son anisótropos, con dimensiones laterales mayores que la altura (como un disco), y poseen la estructura cristalina de una o unas cuantas capas de grafeno conectadas mediante grupos químicos en los bordes. En cambio, los PCC son siempre esféricos y se dividen en nanopartículas de carbono (NC) sin red cristalina (amorfos) y PCC que poseen una red cristalina evidente con hibridación de carbonos sp^2/sp^3 (Iravani y Varma, 2020). Los PCC y los PCG han demostrado propiedades optoelectrónicas avanzadas, baja toxicidad, procedimientos de síntesis sencillos y mayor rentabilidad en comparación con los puntos cuánticos basados en metales. Adicionalmente, los PCG, combinan las propiedades físicas únicas del grafeno otro material merecedor del premio Nobel de física en 2010 compuesto de capas atómicamente finas de carbono (Novoselov, Geim y Jiang, 2004), con los efectos ópticos cuánticos causados por el confinamiento local de electrones (es decir, el confinamiento cuántico). Los PCC y los PCG presentan fotoluminiscencia sintonizable, fotoestabilidad significativa, buena biocompatibilidad y dispersabilidad en agua. También se cree que tienen una toxicidad relativamente baja ya que no están compuestos por materiales sujetos a ninguna restricción legislativa a nivel internacional, lo que los hace muy prometedores para aplicaciones en bioimagen médica, biodetección, administración de fármacos y terapias para el cáncer. Sin embargo, la síntesis tradicional de PCG requiere métodos que consumen mucha energía y/o usan productos químicos agresivos, lo que conlleva inconvenientes significativos, como la contaminación ambiental y la complejidad inherente en su fabricación y en los pasos posteriores de procesamiento, como la separación y purificación,

lo que aumenta los costos y los riesgos de producción (Iravani y Varma, 2020; Le et al., 2023).

Métodos de producción de PCC y PCG

Los PCC y PCG pueden fabricarse utilizando estrategias descendentes y ascendentes (del inglés *top-down* y *bottom-up*, respectivamente). Los enfoques descendentes, utilizan generalmente procedimientos de corte químico o físico de estructuras de carbono relativamente grandes (microscópicas), como la descarga de arco, la ablación/pasivación por láser, la síntesis electroquímica y la oxidación química para controlar las dimensiones y morfología de los PC. Los precursores más comunes de estas técnicas son grandes dominios de carbono con hibridación sp^2 como fullerenos, diamante, grafeno, nanotubos de carbono y óxido de grafeno. Una ventaja de estos métodos es que pueden producir puntos cuánticos de tamaños uniformes y químicamente puros. Algunos de los inconvenientes de los enfoques descendentes son la necesidad de materiales y equipos caros y complejos (grandes inversiones y consumos energéticos), condiciones de reacción extremas (altas temperaturas, condiciones de alto vacío), tiempos de reacción largos y pasos posteriores de procesamiento complicados. La síntesis “ascendente” ha despertado un gran interés debido a su proceso de preparación sencillo y directo. Los PCC y PCG se sintetizan a menudo a partir de moléculas orgánicas pequeñas, como los compuestos fenólicos, mediante métodos ascendentes (Iravani y Varma, 2020; Arias Velasco, Agudelo, Hotza y Gómez González, 2023; Pooja et al., 2023). Dentro de las técnicas ascendentes más comunes se encuentran la síntesis asistida por microondas, síntesis hidrotérmica, y la pirólisis térmica. Como su nombre lo indica, la síntesis por microondas utiliza la radiación electromagnética con longitudes de onda en el rango entre 1 mm a 1 m para romper los enlaces químicos y facilitar la formación de nuevas estructuras en tiempos cortos (menores a 10 minutos). Para preparar PCC y PCG por esta técnica, se han usado como precursores polietilenglicol, sacáridos como la glucosa y la fructosa, y ácido cítrico. Esta técnica se puede combinar también con hidrotérmica y pirólisis, con las cuales se han reportado la síntesis de PCG con un rendimiento cuántico

de emisión (PLQY por sus siglas en inglés) de entre 7% y 11% y de PCC que alcanzaron PLQY de aproximadamente 30% al usar grupos amino para pasivar sus superficies, respectivamente. La carbonización hidrotermal es una técnica rentable y eficiente que permite sintetizar PCC y PCG a partir de sacáridos, ácidos orgánicos u otros compuestos que contengan grupos amino y carboxilo. Los precursores orgánicos y agua como solvente se sellan en un reactor de teflón que se calienta a temperaturas moderadas (180-200 °C) para generar presiones altas dentro del reactor, generando una reacción de cuatro pasos; (1) deshidratación, (2) polimerización, (3) carbonización y (4) pasivación. Gracias a su simplicidad, esta técnica es una de las que se han adoptado mayormente para la síntesis de nanomateriales a partir de biomasa y otras fuentes de carbono, y una de las que presentan mayor potencial de escalabilidad. Sin embargo, el mecanismo de reacción depende fuertemente de la naturaleza de los precursores y se requiere más investigación para comprenderlo y controlarlo. Otros retos que resolver son los costos relativamente altos del recipiente de teflón y la autoclave de acero inoxidable que conforman el reactor, la dificultad de monitorear la reacción en tiempo real debido a la naturaleza cerrada del proceso, así como los riesgos asociados con las altas presiones y temperaturas (Ghosh, Sarkar, Devi, Kim y Kumar, 2021; Brachi, 2020). La pirólisis consiste en la degradación térmica de los precursores en ausencia de oxígeno, de manera que no se produce una combustión. Las propiedades de los PC obtenidos dependen también de los precursores y las temperaturas utilizadas durante el tratamiento. Brachi reportó que el proceso de ensuciamiento con hollín que sufren las esferas de alúmina empleadas como catalizador o material absorbente puede ser empleado para producir PCC con buenas propiedades por medio de pirólisis en condiciones moderadas de temperatura y tiempo, a partir de diferentes fuentes de biomasa de residuos agroindustriales. (Brachi, 2020). Normalmente, las técnicas de enfoque ascendente pueden producir PCC y PCG de mayor calidad, de manera más sencilla y con menos consumo de energía y recursos que las técnicas descendentes, pero los precursores tradicionales suelen ser solventes orgánicos volátiles muy tóxicos, lo que supone un grave riesgo medioambiental (Iravani y Varma, 2020; Pooja et al., 2023). En pocas palabras, los métodos ascendentes presentan mayor potencial de escalamiento para producción a nivel industrial, sin embargo,

hay que encontrar precursores abundantes, económicos y amigables con el ambiente, es decir, que provengan de fuentes naturales. Actualmente, no se ha establecido ningún método de síntesis que permita la producción de PC a gran escala, lo que ha limitado su uso generalizado en dispositivos optoelectrónicos a nivel industrial (Brachi, 2020).

Química verde

Desde principios de la década de 1990, la química verde ha servido de marco para que la industria química pueda contribuir a la sustentabilidad global, enfocándose en el desarrollo de procesos químicos y la exploración de metodologías de síntesis seguras, amigables con el medio ambiente y económicamente viables, que propicien la economía circular. Algunas de las estrategias, incluyen la reducción en la dependencia de combustibles fósiles y de la huella ambiental de los procesos de manufactura, así como del potencial de riesgo y la prevalencia de los productos químicos en el ambiente. Además del uso de materiales renovables y procesos limpios para reducir los impactos negativos, la química verde considera los riesgos toxicológicos de los productos desde su diseño y durante su uso y posconsumo, integrando el pensamiento sistémico y de ciclo de vida para proponer soluciones a largo plazo y verdaderamente sustentables. Algunas de las tendencias actuales se centran en la recuperación o sustitución de materiales críticos (o derivados de combustibles fósiles) por alternativas biobasadas, así como en la identificación de impactos a lo largo de todo el ciclo de vida para poder garantizar la seguridad y circularidad de los procesos y productos (Ganesh et al., 2021). Los procesos de síntesis de PC también se enfocan cada vez más en métodos más verdes para producir nanopartículas de alta calidad y minimizando su impacto ambiental. Entre las estrategias más comunes se incluye el uso de temperaturas más bajas y tiempos de síntesis más cortos, el uso de catalizadores y agua como principal solvente y el uso de residuos ricos en carbono de otros procesos como precursores (Arias Velasco, Agudelo, Hotza, y Gómez González, 2023; Gulati et al., 2023). En este sentido, los puntos cuánticos de carbono y grafeno (y otros nanomateriales), se pueden fabricar a partir de compuestos ricos en carbono provenientes de

plásticos, aguas residuales y fuentes biológicas mediante varios métodos de síntesis (Saha y Dutta, 2022; Pooja et al., 2023). Aunque la elección de precursores y métodos es un proceso complejo debido a la diversidad de combinaciones posibles y los múltiples factores involucrados, el uso de residuos orgánicos, provenientes de la agroindustria, resulta atractivo, ya que permite reducir costos y cerrar el ciclo de estos materiales, evitando que terminen en rellenos sanitarios o que su mal manejo cause problemas ambientales (Marmolejo Manjarrez, Perdigon-Lagunes, Compeán González, Sandoval Reyes y Ahumada-Lazo, 2026).

Residuos orgánicos en México

Actualmente los residuos sólidos urbanos (RSU) representan una problemática con importantes impactos ambientales y sociales, principalmente originados por la mala gestión de estos. En México, las prácticas de manejo de los RSU son inadecuadas o ineficientes, ya que no existe una separación de los residuos por tipo desde el origen que permita su reciclaje o aprovechamiento. Solo un 12% de la recolección es selectiva (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2019), a pesar de que existen instrumentos de gestión, como la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos (*Diario Oficial de la Federación*, 2003). Además, se estima que, de estos residuos, alrededor del 50% son materia orgánica o Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU), principalmente compuesta por residuos alimentarios, residuos de jardinería y poda (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2020). La mayoría de estos residuos terminan en rellenos sanitarios y tiraderos a cielo abierto que carecen de infraestructura para un correcto control y contención de emisiones y contaminantes (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2020) contribuyendo al calentamiento global por la producción de gases de efecto invernadero, contaminación del suelo y el agua por los lixiviados generados y favorece la propagación de enfermedades por las plagas y vectores que se originan en estos sitios, representando también un riesgo para la salud (De Anda Travíña, García Galindo, Peña Castañon, Seminario Peña, y Nieto Garibay, 2021). Tan solo en 2022 se recolectaron alrededor de 108 146 toneladas de

RSU, de las cuales, casi la mitad provenía de los estados de Ciudad de México, Estado de México, Jalisco, Veracruz, Nuevo León y Guanajuato (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2023; Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2024). Adicionalmente, el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) identificó que para ese mismo año alrededor de 150 municipios de la república aún no contaban con un servicio de recolección de residuos, por lo que la población opta por la quema para desecharlos. Esta ausencia de recolección ocurre principalmente en los estados de Chiapas, Oaxaca, Puebla y Veracruz (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2020).

Otra cuestión importante es la fuente de los residuos, que influye directamente en los requisitos para la gestión de estos. De acuerdo con inventarios de residuos anuales de la CDMX, la generación de residuos residencial representa alrededor del 47.7%, pero otros sectores que también contribuyen son el comercial (15.4%), servicios (13.6%), mercados (10.6%), Central de Abasto (4.6%), diversos (5.1%) y controlados (3%) (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México, 2018). Por lo que podemos observar que las principales fuentes son los residuos domiciliarios y de actividades económicas (comercial, servicios y mercados).

Por otro lado, si bien una gran parte de los residuos orgánicos corresponden a los residuos sólidos urbanos (RSU), en México los residuos agroindustriales también representan un mercado de interés para atender. La agroindustria es definida como el conjunto de actividades relacionadas con transformación de los productos procedentes de la agricultura, la ganadería, la pesca y lo forestal, es decir, elaboración de materias primas y productos intermedios derivados del sector agrícola (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 1997). En México se cultivan alrededor de 200 productos agrícolas destinados al consumo tanto nacional como internacional (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2015) y los productos generados a partir de estas actividades son principalmente verduras, frutas, tubérculos, semillas, raíces, hojas y madera, de las cuales muchos se comercializan en fresco, pero también algunos son transformados a otros productos como aceites, harinas, jugos, néctares, vinos, conservas, entre otros. En la cosecha de cultivos se generan residuos primarios que provienen de operaciones de poda, corte, clasificación

y renovación de cultivos, como son: tallos, hojas, vainas, paja o frutos con calidad no comercial. Mientras que en la postcosecha se generan residuos secundarios obtenidos del procesamiento, como lo son cáscaras, bagazo, mazorcas y olotes, entre otros (Mejías-Brizuela, Orozco-Guillen y Galáan-Hernández, 2016).

Por la diversidad de las actividades, se llegan a generar varios tipos de residuos, pero la porción orgánica proviene principalmente de la agricultura y las actividades forestales. Estos residuos se rigen por la Norma Oficial Mexicana NOM-161-SEMARNAT-2011 (fracción III del Artículo 9), que clasifica a los Residuos de Manejo Especial (*Diario Oficial de la Federación*, 2013). En este caso los residuos orgánicos agroindustriales entran en dicha clasificación por su volumen de generación, superior a las 10 toneladas anuales. Sin embargo, esta legislación es poco específica y existen varios vacíos legales que aprovechan las industrias, por lo que es necesario promover la gestión de estos residuos asegurando un manejo integral desde su generación hasta su disposición final (Mejías-Brizuela, Orozco-Guillen y Galáan-Hernández, 2016).

Aunque se estima que las cantidades de residuos generados en estas actividades son altas, no existe un inventario preciso que determine los volúmenes o cantidades totales. Esto se debe principalmente al manejo de los residuos, que muchas veces son gestionados por los mismos productores sin cuantificarlos. Entre las prácticas más comunes entre los agricultores se encuentran la reincorporación de la biomasa al suelo, el compostaje, el aprovechamiento como forraje en la alimentación para ganado y, por último, una de las prácticas más utilizadas es la quema de restos de cultivos en el campo (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2015), una actividad que afecta la fertilidad de suelos por la pérdida de nutrientes, eliminación de organismos y microorganismos encargados de la descomposición de la materia orgánica, modificando los procesos de aireación del suelo y liberación de nutrientes (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2024), además de provocar en algunos casos incendios que salen de control afectando otras áreas naturales.

Una de las estimaciones más precisas de residuos orgánicos de la agroindustria, hasta el momento en nuestro país, es el Atlas Nacional de Biomasa (ANBIO), un estudio realizado por la Secretaría de Energía en co-

laboración con la Comisión Federal de Electricidad, con la finalidad de ubicar las principales fuentes generadoras de biomasa que puede ser utilizada con fines energéticos (Secretaría de Energía, 2018), debido a la reciente Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos en México (*Diario Oficial de la Federación*, 2008). Los resultados mostraron que, en el año 2012, la biomasa y la biomasa residual estimada era aproximadamente 278 millones de toneladas de residuos sólidos, donde el 58% provenía de los bosques y 27% de los residuos agrícolas y forestales (Secretaría de Energía, 2018). La biomasa residual se clasificó en cuatro grupos, de acuerdo con las actividades productivas más importantes que generan materia orgánica: agrícola y forestal, pecuaria, urbana e industrial; mientras que la biomasa, se consideró como la generada a partir de cultivos para fines energéticos. La porción correspondiente al total de la generación de biomasa residual agrícola fue de 52.102 millones de toneladas en base seca, durante tiempo de cosecha considerando sólo 20 cultivos temporales y 21 cultivos perennes (tabla 8.1).

Tabla 8.1. *Tipos de cultivos y especies consideradas en el Atlas Nacional de Biomasa*

<i>Tipos de cultivo</i>	<i>Especies incluidas</i>
Cultivos perennes	Agave, aguacate, café, cereza, caña de azúcar, coco, guayaba, limón, maguey pulquero, mandarina, mango, manzana, naranja, nopales, palma africana, papaya, piña, plátano, tangerina, toronja, tuna y uva.
Cultivos temporales	Algodón hueso, brócoli, calabacita, cebada en grano, cebolla, chile verde, elote, fresa, frijol, garbanzo grano, maíz grano, melón, papa, pepino, sandía y zanahoria

Fuente: Secretaría de Energía (2018).

Finalmente, aunque existen algunas alternativas para contribuir al manejo de la porción orgánica de los residuos en nuestro país, como su aprovechamiento mediante métodos de compostaje, lombricomposta, biodigestión, incineración e incluso tecnologías más avanzadas como la generación de biocarbón (Escalante Rebolledo et al., 2016) o la biorrefinería (Jacob-Lopes, Queiroz Zepka y Costa Deprá, 2022), estas prácticas no son generalizadas y sólo atienden un porcentaje muy pequeño del mercado (aproximadamente 56 427 toneladas por día, que representa sólo el 7%) (Comisión para la Cooperación Ambiental, 2017) y (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2020). Uno de los principales problemas para la im-

plementación de dichas alternativas es la complejidad o el alto costo (De Anda Trasviña, García Galindo, Peña Castañón, Seminario Peña y Nieto Garibay, 2021), y que, desafortunadamente, los productos generados no representan un mercado de valor que permita cubrirlo. En los últimos años se han incrementado los esfuerzos para buscar promover estas alternativas de gestión de los residuos orgánicos para disminuir sus impactos ambientales. Sin embargo, aún se requiere la caracterización de los residuos para determinar con mayor precisión la cantidad real generada y su composición y, de esta forma seleccionar el proceso o sector donde puede ser aprovechado de mejor manera y, con ello, lograr productos con alto valor añadido generando ingresos extras para los productores, o buscar la disposición final apropiada por no tener un valor comercial, es decir su disposición como desecho orgánico.

Biomasa de residuos agrícolas como precursores para PCC y PCG

El conocimiento de los componentes presentes en la materia orgánica residual es útil para evaluar la posibilidad de utilizarlos como materia prima en algunos procesos o emplearlos como fuentes de compuestos de interés, permitiendo su revalorización. Aunque estos residuos tienen composición variable, hay algunos componentes en común como la celulosa, lignina, hemicelulosa, pectina, lípidos, proteínas, azúcares y almidón, entre otros (Sanchez-Silva, González-Estrada, Blancas-Benitez y Fonseca-Cantabrana, 2020; Saval, 2012; Díaz-Montes, 2022). Algunos de estos componentes son de difícil degradación, lo que limita su manejo para ciertos procesos (Mejías-Brizuela, Orozco-Guillen y Galáan-Hernández, 2016), mientras que para otros los vuelve más atractivos, por ejemplo, en aplicaciones biotecnológicas como sustratos atractivos para la producción de enzimas de aplicación industrial (Saval, 2012). También, los elementos, compuestos o grupos funcionales que pueden aportar estos residuos son de interés para una serie de aplicaciones como la absorción de metales pesados (Sanchez-Silva, González-Estrada, Blancas-Benitez y Fonseca-Cantabrana, 2020), la remoción de contaminantes, sustratos fermentables (fuentes de C o N) o sustra-

tos no convencionales, la obtención de disoluciones de azúcares u otros compuestos de interés como el ácido láctico, la producción de pigmentos o antibióticos (Barragán Huerta, Téllez Díaz y Laguna Trinidad, 2008), e incluso para la fabricación de materiales compuestos y resinas termoplásticas (Tronc et al., 2007).

La biomasa residual es una fuente económica, renovable, rentable, confiable y natural de carbono para la síntesis de PCC y PCG (Kadyan et al., 2023), pero, además, el resto de los compuestos presentes en la misma influyen en sus propiedades y potenciales aplicaciones en diversos campos como la biomedicina o la energía. Dentro de los compuestos de interés aprovechados para la síntesis de PCC y PCG con propiedades específicas están azúcares como la glucosa, fructosa o sacarosa, ácidos como el cítrico y el ascórbico, los compuestos fenólicos, y los grupos hidroxilo, carboxilo o carbonilo (Ravi y Vadukumpully, 2016). Por otro lado, varios autores han investigado el uso de biomasa como precursor en la síntesis de PCC y PCG. Algunas de las materias primas que han utilizado son cáscara de arroz, residuos de té, bagazo de caña de azúcar, cáscaras y hojas de frutas como el mango, el coco, el plátano o la naranja, diversas partes del maíz, granos de cacao o café, por mencionar algunos (Kadyan et al., 2023; Kumar Saha y Dutta, 2022).

Propiedades, ventajas y aplicaciones de los PCC y PCG

Como se mencionó anteriormente, los PCC y PCG presentan ciertas ventajas generales respecto a los puntos cuánticos de metales o semiconductores, por ejemplo, biocompatibilidad debido a su baja toxicidad, hidrosolubilidad, propiedades ópticas y eléctricas avanzadas, y menor costo. Sin embargo, las aplicaciones particulares de estos materiales dependen de sus propiedades específicas, las cuales están determinadas por los precursores, los métodos y las condiciones de síntesis. De esta manera, se puede impartir diferentes propiedades como fotoluminiscencia dependiente del tamaño o de la energía de excitación, emisión estable o parpadeante, superficies hidrofílicas o hidrofóbicas y moléculas en la superficie que permitan ampliar sus aplica-

ciones a campos que incluyen la ciencia de materiales, la química, la física, la biología y la medicina. Una de las características más deseadas en un lote de PC, es la uniformidad en morfología y tamaños de partícula. Aunque algunos de los métodos de síntesis facilitan esto, por lo general se requieren procesos adicionales de purificación y separación, como la filtración, centrifugación, y diálisis. En cuanto a estructura, la mayoría de los autores que reportaron la síntesis de PCC por diferentes métodos, observaron núcleos de carbono amorfo y una variedad de grupos funcionales en la superficie, mientras otros reportaron la existencia de estructuras de carbono cristalino sp^2 , grafito, óxido de grafito, y estructuras como la del diamante dentro del núcleo, dependiendo del método de síntesis y el precursor utilizado. Por otro lado, los PCG muestran muy buena cristalinidad que se origina de las capas de grafeno que los conforman. En ambos casos, se observan grupos funcionales que contienen oxígeno en las superficies. Los PCC preparados por métodos ascendentes presentan menos defectos estructurales que los preparados por métodos descendentes, debido probablemente a la mayor oxidación superficial. Estos defectos imparten estados energéticos que se originan de los orbitales moleculares y actúan como trampas de cargas, limitando su movilidad y afectando la fluorescencia. Las superficies se pueden pasivar para eliminar estas trampas, adhiriendo grupos poliméricos que funcionan como aislante o por medio de tratamientos ácidos que blindan los PC contra impurezas. También se han usado diversos grupos químicos como diaminas, tioles, hidracinas, y alquilaminas para funcionalizar las superficies de PCC. Estos generalmente actúan como donadores de electrones, previniendo la recombinación no radiactiva y mejorando el rendimiento de emisión (PLQY). Los PCG, poseen una estructura electrónica muy similar a la de grafeno con la diferencia de que los efectos de confinamiento cuántico modifican el ancho de banda prohibida (del inglés *band gap*) que es de “cero”, para grafeno 2D a “no-cero” para los PCG (0D), influenciada además por los efectos de los dopantes o grupos funcionales en la superficie. Los PCC, al estar formados por moléculas orgánicas, presentan estructuras electrónicas definidas por la teoría de orbital molecular con un total de cinco orbitales moleculares asignados σ , π , n (no enlazantes), σ^* (antienlazante), y π^* (antienlazante). Las transiciones posibles entre estos orbitales originan la absorción en el rango UV-visible (σ/σ^* a ~ 125 nm, n/σ^* a ~ 150 -

250 nm, π/π^* a $\sim 200\text{-}400$ nm y n/π^* a $\sim 400\text{-}700$ nm). Esto tiene aplicaciones en fotodetectores y en la captura y conversión de energía solar. Los PCG generalmente muestran absorbancias relativamente más débiles en comparación con los PCC, con máximos a ~ 380 nm que se origina de la transición n/π^* entre enlaces C=O y los grupos funcionales. En ambos tipos de puntos cuánticos, la forma de los espectros de absorción se puede modificar cambiando estos grupos funcionales, o pasivando las superficies. Otra forma de impartir propiedades especiales es mediante el dopaje con átomos de elementos como azufre, nitrógeno, boro, calcio, telurio, selenio, fósforo, silicio, o halógenos. Estos elementos modifican la estructura electrónica y las bandas energéticas de los PC, impartiendo nuevas propiedades. La emisión de luz (fotoluminiscencia) de los puntos cuánticos surgen de la recombinación radiativa de las cargas (electrones y huecos) que se pueden generar mediante excitación dentro de ellos. Estos procesos de recombinación son potenciados por el efecto de confinamiento cuántico. Además, la energía de absorción y emisión se puede ajustar mediante el control de los tamaños de partícula. Los PCC pueden presentar bajas eficiencias de emisión (menores al 15%) debido a que los defectos o grupos funcionales en la superficie pueden atrapar las cargas, evitando su recombinación radiativa. Mediante la pasivación de las superficies, se pueden eliminar estas trampas y mejorar significativamente las eficiencias de emisión. En general, los PCG presentan mejores propiedades de emisión debido a su cristalinidad y estructura de capas que los PCC. Sin embargo, se requiere más investigación para comprender completamente los mecanismos. Ambos tipos de puntos cuánticos presentan fotoestabilidad, lo cual es una propiedad muy deseable en materiales emisivos. Los grupos funcionales también pueden modificar las propiedades eléctricas de los PCC/PCG que suelen ser análogas a las del óxido de grafeno, mejorando su conductividad (Ghosh, Sarkar, Devi, Kim y Kumar, 2021; Arias Velasco, Agudelo, Hotza y Gómez González, 2023; Gulati et al., 2023). Gracias a estas características y a la facilidad de modificarlas mediante la funcionalización de la superficie, los PCC y PCG han encontrado una gran variedad de aplicaciones que aprovechan sus propiedades ópticas, eléctricas, y la capacidad de los grupos funcionales para producir diferentes efectos o reacciones químicas. Por ejemplo, en fotodetectores (de banda ancha o regiones específicas del espectro), cuyo principio consiste en con-

vertir los fotones absorbidos por el material fotosensible en una señal eléctrica. Igualmente se pueden fabricar biosensores para la detección de enfermedades, así como diferentes tipos de sensores para varios elementos y compuestos, como metales pesados, iones, moléculas orgánicas como glucosa, dopamina, ácido úrico, antibióticos, e incluso otras nanopartículas. También se han propuesto sensores de propiedades como temperatura, pH, y conductividad eléctrica. Una de las aplicaciones más prometedoras de los puntos cuánticos a base de carbono es en la bioimagen médica. Esta consiste en observar y detectar ciertas moléculas y tejidos en el cuerpo mediante métodos no invasivos. Los puntos cuánticos de metales y semiconductores se han usado desde hace tiempo para sustituir a los colorantes tradicionales que se usan como marcadores en las técnicas de bioimagen médica, debido a sus propiedades superiores como su fotoestabilidad y emisión más eficiente, con energías sintonizables y de espectros angostos, lo que facilita su detección, así como su inercia química. Sin embargo, existe preocupación por la toxicidad de estos materiales y sus efectos negativos para la salud, por lo que los PCC y PCG resultan muy atractivos gracias a su biocompatibilidad. Por otro lado, se ha encontrado que los PCC y PCG presentan actividad antimicrobiana mostrando buena actividad para el control de bacterias como *E. coli*, *S. aureus* y *P. aeruginosa*. Adicionalmente, los PCG se han utilizado como nanotrasportadores en sistemas de distribución de medicamentos dentro del cuerpo, por ejemplo, con el medicamento para el cáncer dox. También, se han fabricado tintas a base de puntos cuánticos para agregar marcas de agua anti-falsificación a diversos bienes como, documentos, códigos de barras, y dinero, o para la encriptación de información (Zhao et al., 2023). En el área ambiental, los PCC también han encontrado aplicaciones en la adsorción de contaminantes en medios acuosos y gaseosos, y se han usado en combinación con otros materiales para formar compósitos con buena actividad en la degradación fotocatalítica de contaminantes o en la producción de combustibles como H_2 y H_2O_2 . Otros compósitos de PCC se han utilizado en dispositivos de almacenamiento de energía como baterías y supercapacitores. Gracias a su amplio espectro de absorción y sus buenas propiedades conductoras, también se han incorporado PCC en las diferentes capas que componen las estructuras de “sándwich” de las celdas solares; en las capas transportadoras de huecos y electro-

nes, como material principal o como dopantes en la capa activa (absorción de luz) y como espaciadores entre capas, para promover la separación de cargas, aumentando la eficiencia de conversión de fotones a electrones (Pooja et al., 2023; Arias Velasco, Agudelo, Hotza, y Gómez González, 2023). Una de las aplicaciones de los puntos cuánticos más desarrolladas actualmente, son los dispositivos emisores de luz o LEDs por sus siglas en inglés, tanto para iluminación como para pantallas de dispositivos, como se ha observado con la entrada al mercado de las QLED TVs. Estas pantallas ofrecen ventajas como una gama de colores más amplia, mayor contraste y resolución (píxeles por pulgada) que las pantallas de TV convencionales, así como la posibilidad de fabricar pantallas de gran formato, como anuncios espectaculares o la esfera de Madison Square Garden en Las Vegas Nevada en un futuro. Por supuesto, los PCC y PCG también ha comenzado a reemplazar a los PC de metales y semiconductores en estas aplicaciones y se han reportado LEDs de luz blanca fabricados a partir de películas fluorescentes tricolor de PCG, en los cuales se ajustaron los tamaños de partículas para lograr emisiones de color azul y verde, mientras la emisión roja se logró controlando el contenido de oxígeno y los enlaces C=N durante los procesos de síntesis (Zhao et al., 2023). Sin duda, continuaremos viendo grandes avances en la síntesis y funcionalización de estos nanomateriales, así como el surgimiento de nuevas aplicaciones que irán avanzando a niveles industriales y etapas comerciales, conforme se vayan solucionando los problemas ambientales y de escalabilidad antes mencionados.

Oportunidades, retos y perspectiva para México

En verano de 2023 en el Tecnológico de Monterrey región Ciudad de México conformamos un nuevo grupo de investigación multidisciplinario, gracias a un fondo semilla que surge del acuerdo de colaboración con la Universidad de Alberta, para explorar la síntesis sustentable y escalable de puntos cuánticos a base de carbón a partir de residuos agroforestales en México y de asfalteno (subproducto del bitumen) en Canadá. Para apoyarnos en la compleja tarea de navegar la amplia variedad de posibles precur-

sores, métodos de síntesis y propiedades reportadas en la literatura, y que se han mencionado de manera resumida en este capítulo, desarrollamos un modelo matemático de optimización que nos permite seleccionar las condiciones más apropiadas y aterrizadas al contexto mexicano. El modelo, implementado en Python, utiliza programación lineal de enteros mixtos para maximizar el éxito del proyecto teniendo en cuenta criterios como la disponibilidad de precursores, la priorización de residuos y la distancia al lugar de síntesis. Un caso de estudio realizado en Ciudad de México demuestra la eficacia del modelo en la identificación de escenarios óptimos y la asignación de recursos. Los resultados revelan las combinaciones preferidas de precursores y métodos de síntesis, y resaltan la adaptabilidad del modelo a las distintas ponderaciones de los criterios de evaluación. Una ventaja del modelo es su capacidad para evaluar rápidamente diferentes circunstancias y ayudar en la toma de decisiones, lo que mejora su robustez. Por otra parte, el modelo puede escalarse fácilmente ya que el coste computacional es bajo, pudiendo beneficiarse de alimentarlo con bases de datos más grandes y diversificadas para lograr mejores resultados, así como incorporar modelos de visualización como Power BI (Marmolejo Manjarez, Perdigon-Lagunes, Compeán González, Sandoval Reyes y Ahumada-Lazo, 2026).

Con base en este estudio y las capacidades técnicas a nuestro alcance, decidimos comenzar con la exploración del método de síntesis hidrotermal a partir de hojas y olote de maíz (*Zea mays*) y cáscaras de naranja (*Citrus sinensis*), siguiendo los procedimientos reportados por (Eskalen, Yaykaşlı, Kavgacı, y Kayış, 2022; Wang et al., 2022; Prasannan e Imae, 2013), respectivamente. Esto con el objetivo de analizar la viabilidad de omitir los pretratamientos ácidos que los autores utilizaron para acondicionar sus precursores o sustituirlos por otros más acordes a los principios de la química verde. Los resultados preliminares son prometedores, ya que logramos obtener nanopartículas fluorescentes a partir de los tres precursores con y sin pretratamiento. Los espectros de absorción de las nanopartículas producidas a partir de hoja de maíz con y sin pretratamiento son prácticamente idénticos, presentando curvas suaves con máximos en el ultravioleta (~260 nm), con una cola que se extiende hacia el visible hasta aproximadamente los 550 nm. Por otro lado, los materiales a partir de olote también presentan

espectros similares, sin embargo, para la muestra con pretratamiento ácido, se observa una característica con forma de hombro (~300 nm) y un desplazamiento de la cola hacia el azul, con respecto a la del material sin pretratamiento, sugiriendo diferencias estructurales y en la distribución de tamaños de partícula. En el caso de los materiales preparados a partir de cáscara de naranja se observa la forma de hombro (~390 nm) para el espectro sin pretratamiento, pero un desplazamiento de la cola hacia el rojo en comparación con el material pretratado. En fotoluminiscencia, los espectros de excitación y emisión muestran concordancia con los de absorción, pero se necesita mayor análisis para interpretarlos correctamente. También se caracterizaron los precursores y los productos por espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) y estos últimos también por dispersión dinámica de luz (DLS) y microscopía electrónica de transmisión (TEM) para determinar tamaños y composición química. Sin embargo, estos análisis y su interpretación siguen en proceso para la redacción de un artículo científico, por lo que no podemos dar más detalles en este momento. Los siguientes pasos serán investigar las dinámicas de las cargas generadas en estas nanopartículas, con apoyo de nuestro colaborador en la Universidad de Alberta y su laboratorio de espectroscopía ultrarrápida, para determinar sus aplicaciones más apropiadas.

Como muchos autores han demostrado, la síntesis de PCC y PCG a partir de diversos residuos orgánicos y por medio de métodos de química verde es posible, al menos a escala de laboratorio. Sin embargo, aún se requiere más investigación sobre la relación entre precursores, métodos, características fisicoquímicas, propiedades y aplicaciones, para poder impartir propiedades y funciones de forma intencionada y sistémica, así como para resolver algunos problemas identificados como, bajas eficiencias de emisión, baja absorbancia y poca conductividad intrínseca. El siguiente reto es lograr la producción homogénea y a gran escala, basada en química verde y que además resulte económicamente viable. Para esto, se requiere partir de materias primas económicas y abundantes (como los residuos orgánicos) y utilizar métodos que generen productos de alta calidad y con altos rendimientos de producción.

En México se producen grandes cantidades de estos precursores potenciales. Sin embargo, se requiere más trabajo de investigación para ana-

lizarlos y determinar cuáles son los más adecuados. Igualmente, se requiere una mejora general en su gestión para que puedan ser aprovechados y generen valor agregado en lugar de convertirse en un problema ambiental. Las tecnologías actuales para el tratamiento de residuos orgánicos como las plantas de carbonización hidrotermal pueden contribuir a la reducción de emisiones de gases de efecto y tratar de certificarse para monetizar a través del mercado de créditos de carbono. En la Ciudad de México existe un módulo de este tipo con la capacidad de procesar 72 toneladas de residuos orgánicos al día para producir energía y pellets de carbón vegetal, pero el proyecto completo contempla 36 de estos módulos (Dirección General de Comunicación Social, 2024). Esta tecnología se puede adaptar y/o utilizar en conjunto para la producción de PCC y PCG que utilicen residuos valorizables como materia prima, para generar productos de mayor valor comercial, y con ello, mayor ingreso económico para los productores primarios si saben aprovecharlo. La situación actual de la diplomacia internacional puede ser una oportunidad para que México encuentre un lugar en el mercado que pudiera darse por la guerra comercial entre las principales potencias en electrónica y materiales críticos. Si no, por lo menos asegurar la autosuficiencia para que no nos lleven entre las patas.

Conclusión

Los puntos cuánticos son una tecnología emergente que se ha desarrollado impresionantemente rápido y con gran potencial para mejorar la vida de las personas gracias a sus múltiples aplicaciones en medicina, química, ciencias ambientales y optoelectrónica. Sin embargo, es necesario tomar una postura sustentable a la hora de desarrollar tecnología y escalar los métodos de producción. Esto es posible y además puede resultar económicamente atractivo si se hace de manera informada y correcta, para lo que se necesita hacer investigación continua que permitan la innovación y la transferencia tecnológica. También, es necesario contar con inversionistas con visión y capital para absorber los costos mientras se recupera la inversión. El mercado de los PC es creciente y diversificable y a través de la economía circular, se puede lograr minimizar los costos de la materia prima por medio de con-

venios de colaboración entre productores y transformadores para una gestión más eficiente de residuos y proyectos más rentables. Esto además generaría beneficios sociales y ambientales, como la creación de empleos especializados y la mejora del entorno y la calidad de vida en las comunidades. La economía circular, aplicada al desarrollo tecnológico de nanomateriales para diversas aplicaciones de interés comercial, tiene el potencial de desafiar el status quo y abrir el mercado a economías emergentes como la de México, que presentan varios desafíos, pero también enormes oportunidades.

Referencias

- Ahumada-Lazo, R. (2019). *Surface properties and charge dynamics in semiconductor microcrystals and nanocrystals*. University of Manchester.
- Arias Velasco, V., Agudelo, A. C., Hotza, D. y Gómez González, S. Y. (2023). Context and prospects of carbon quantum dots applied to environmental solutions. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 1-34.
- Barragán Huerta, B. E., Téllez Díaz, Y. A. y Laguna Trinidad, A. (2008). Utilización de residuos agroindustriales. *Revista Sistemas Ambientales*, 2(1), 44-50.
- Brachi, P. (2020). Synthesis of fluorescent carbon quantum dots (CQD's) through the mild thermal treatment of agro-industrial residues assisted by γ -alumina. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1301-1312.
- Comisión para la Cooperación Ambiental. (2017). *Caracterización y gestión de los residuos orgánicos en América del Norte, informe sintético*.
- De Anda Trasviña, A., García Galindo, E., Peña Castañón, A. Z., Seminario Peña, J. V. y Nieto Garibay, A. (2021). Residuos orgánicos: ¿basura o recurso? *Recursos Naturales y Sociedad*, 7(3), 19-42. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2021.07.07.03.0004>
- Diario Oficial de la Federación. (2003). Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGPGIR.pdf>
- Diario Oficial de la Federación. (2008). Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos en México. <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LPDB.pdf>
- Diario Oficial de la Federación. (2013). NOM-161-SEMARNAT-2011. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5286505&fecha=01/02/2013
- Díaz-Montes, E. (2022, septiembre-diciembre). Residuos agroalimentarios ¿qué son? ¿quién los genera? y ¿por qué son valiosos? *Frontera Biotecnológica*, 9-16.
- Dirección General de Comunicación Social. (2024, 25 de diciembre). México reducirá gases de efecto invernadero con planta de carbonización hidrotermal. *Boletín UNAM*.
- Escalante Rebolledo, A., Pérez López, G., Hidalgo Moreno, C., López Collado, J., Campo

- Alves, J., Valtierra Pacheco, E. y Etchevers Barra, J. D. (2016). Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo. *Terra Latinoamericana*, 34(3), 367-382.
- Eskalen, H. yaykaşlı, H., Kavgaç, M. y Kayış, A. (2022). Investigating the PVA/TiO₂/CDs polymer nanocomposites: Effect of carbon dots for photocatalytic degradation of Rhodamine B. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 4643-4658.
- Ganesh, K. N., Zhang, D., Miller, S. J., Rossen, K., Chirik, P. J., Kozłowski, M. C., ... y Voutchkova-Kostal, A. M. (2021). Green chemistry: A framework for a sustainable future. *Environmental Science & Technology*, 8459-8463.
- Ghosh, D., Sarkar, K., Devi, P., Kim, K.-H. y Kumar, P. (2021). Current and future perspectives of carbon and graphene quantum dots. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Guan, X., Li, Z., Geng, X., Lei, Z., Karakoti, A., Wu, T., ... y Vinu, A. (2023). Emerging trends of carbon-based quantum dots: Nanoarchitectonics and applications. *Small*, 1-65.
- Gulati, S., Baul, A., Amar, A., Wadhwa, R., Kumar, S. y Varma, R. S. (2023). Eco-friendly and sustainable pathways to photoluminescent carbon quantum dots (CQD's). *Nanomaterials*, 1-40.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2019). *Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Delegacionales 2019. Módulo 6: Residuos sólidos urbanos*. <https://www.inegi.org.mx/programas/cngmd/2019/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2020, 3 de junio). *Estadísticas a propósito del Día Mundial del Medio Ambiente*. https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/aproposito/2020/ambiente2020_Nal.pdf
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2023). *Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Demarcaciones Territoriales de la Ciudad de México (CNGMD)*. <https://www.inegi.org.mx/programas/cngmd/2023/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2024). *Marco geoestadístico (MG)*. <https://www.inegi.org.mx/temas/mg/>
- Iravani, S. y Varma, R. (2020). Green synthesis, biomedical and biotechnological applications of carbon and graphene quantum dots: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 703-727.
- Jacob-Lopes, E., Queiroz Zepka, L. y Costa Deprá, M. (Eds.). (2022). *Handbook of waste biorefinery*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-06562-0>
- Kadyan, P., Malik, R., Bhatia, S., Al Harrasi, A., Mohan, S. yadav, M., ... y Arasu, T. (2023). Comprehensive review on synthesis, applications, and challenges of graphene quantum dots (GQD's). *Journal of Nanomaterials*, 1-26. <https://doi.org/10.1155/2023/2832964>
- Kumar Saha, J. y Dutta, A. (2022). A review of graphene: Material synthesis from biomass sources. *Waste and Biomass Valorization*, 1385-1429. <https://doi.org/10.1007/s12649-021-01577-w>
- Le, T., Qian, L., Sheng, Q., Meiqin, L., Jinwoo, S., Pan, W., ... y Jong, S. K. (2023). Recent developments in carbon dots: A biomedical application perspective. *Journal of Materials Chemistry B*, 3038-3053.
- Marmolejo Manjarrez, F., Perdigon-Lagunes, P., Compeán González, C. L., Sandoval

- Reyes, M. y Ahumada-Lazo, R. (2026). Optimization methodology for project management: A case study for Quantum Dots Synthesis. *AIP Conference Proceedings (Accepted)*. AIP.
- Mejías-Brizuela, N., Orozco-Guillen, E. y Galán-Hernández, N. (2016). Aprovechamiento de los residuos agroindustriales y su contribución al desarrollo sostenible de México. *Revista de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales*, 27-41.
- Nevelius, E. (2023, 4 de octubre). *The Nobel Prize in Chemistry 2023*.
- Novoselov, K., Geim, A., S. V ., M. y Jiang, D. Z. (2004). Electric field effect in atomically thin carbon films. *Science*, 666-669.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (1997). *El estado mundial de la agricultura y la alimentación*.
- Pooja, K., Rohit, M., Saurabh, B., Ahmed, A. H., Syam, M., Mansi, Y., ... Thillai, A. (2023). Comprehensive review on synthesis, applications, and challenges of graphene quantum dots (GQD's). *Journal of Nanomaterials*, 1-26.
- Prasannan, A. y Imae, T. (2013). One-pot synthesis of fluorescent carbon dots from orange waste. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 15673-15678.
- Ravi, S. y Vadukumpully, S. (2016). Sustainable carbon nanomaterials: Recent advances and its applications in energy and environmental remediation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 835-856. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2015.11.026>
- Saha, J. K. y Dutta, A. (2022). A review of graphene: Material synthesis from biomass sources. *Waste Biomass Valorization*, 1385-1429.
- Sanchez-Silva, J. M., González-Estrada, R. R., Blancas-Benitez, F. J. y Fonseca-Cantabrana, Á. (2020). Utilización de subproductos agroindustriales para la bioadsorción de metales pesados. *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 23, 1-18. <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2020.0.261>
- Saval, S. (2012). Aprovechamiento de residuos agroindustriales: Pasado, presente y futuro. *Biotecnología*, 16(2), 14-46.
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2015, octubre). *Plan de manejo de residuos generados en actividades agrícolas. Primera etapa: diagnóstico nacional*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/346963/Manejo_de_Residuos_Reporte_Ejecutivo.pdf
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2024). *Iniciativa gubernamental "Mi parcela no se quema"*. <https://www.gob.mx/agricultura/acciones-y-programas/miparcelanosequema>
- Secretaría de Energía. (2018). *Atlas nacional de biomasa*. <https://www.gob.mx/sener/articulos/atlas-nacional-de-biomasa>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2020, mayo). *Diagnóstico básico para la gestión integral de residuos*. <https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/diagnostico-basico-para-la-gestion-integral-de-los-residuos-2020>
- Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México. (2018). *Inventario de residuos sólidos de la Ciudad de México*. <https://www.sedema.cdmx.gob.mx/storage/app/media/DGCPA/IRS-2018-JUNIO.pdf>

- Tamang, S., Wegner, K. D. y Reiss, P. (2025). *Quantum dot material systems, compositional families*. John Wiley & Sons.
- Technavio. (2023). *Quantum dots market size to grow by USD 5,842.61 million from 2022 to 2027; Growth driven by rising demand for optimized devices*. PR Newswire.
- Tronc, E., Hernández-Escobar, C., Ibarra-Gómez, R., Estrada-Monje, A., Navarrete-Bolaños, J. y Zaragoza-Contreras, E. (2007). Blue agave fiber esterification for the reinforcement of thermoplastic composites. *Carbohydrate Polymers*, 67, 245-255.
- Wang, Y., He, Q., Zhao, X. yuan, J., Zhao, H., Wang, G. y Li, M. (2022). Synthesis of corn straw-based graphene quantum dots (GQD's) and their application in PO43-detection. *Journal of Environmental Chemical Engineering*.
- Xu, X., Ray, R., Gu, Y., Ploehn, H. J., Gearheart, L., Raker, K. y Scrivens, W. A. (2004). Electrophoretic analysis and purification of fluorescent single-walled carbon nanotube fragments. *Journal of the American Chemical Society*, 12736-12737.
- Zhao, Y., Bingli, G., Guo, G., Li, Y., Li, T., Zhu, Y., ... y Chen, D. (2023). Bright tunable multicolor graphene quantum dots for light-emitting devices and anticounterfeiting applications. *ACS Applied Nano Materials*, 3245-325.