

Del 'superbenceno' a los 'superhelicos' para emitir CPL

From 'superbenzene' to 'superhelices' for CPL emission

José L. Páez, Lidia Hortigüela, Carlos M. Cruz, Araceli G. Campaña*

Departamento de Química Orgánica, Unidad de Excelencia de Química (UEQ), Facultad de Ciencias,
Universidad de Granada.

PALABRAS CLAVE:

Nanografenos
Quiralidad
CPL
Curvatura
Heptágonos

KEYWORDS:

Nanographenes
Chirality
CPL
Curvature
Heptagons

RESUMEN:

Los nanografenos quirales representan una nueva clase de materiales con capacidad para emitir luz circularmente polarizada, posicionándose como potenciales candidatos en optoelectrónica quiral. Este trabajo reúne algunos de los últimos avances en síntesis y diseño de NGs quirales, destacando estrategias moleculares que permiten modular la respuesta de CPL. Adicionalmente, se discuten las perspectivas de futuro encaminadas a la optimización de la eficiencia de CPL y el potencial de estas entidades en aplicaciones tecnológicas avanzadas.

ABSTRACT:

Chiral nanographenes represent a new type of material capable of emitting circularly polarized light, positioning them as potential candidates in chiral optoelectronics. This work selects some of the latest advances in the synthesis and design of chiral NGs, highlighting molecular strategies that enable modulation of CPL response. Additionally, future perspectives toward optimizing CPL efficiency and the potential of these entities in advanced technological applications are discussed.

Introducción

Desde su descubrimiento en 1825 por Michael Faraday, la molécula de benceno se ha convertido en una piedra angular en el desarrollo de la ciencia de materiales, y en un nexo fundamental entre la química y la ciencia de materiales moleculares. Así, a lo largo de los últimos 200 años, se ha desarrollado una amplia variedad de materiales basados en esta unidad hexagonal aromática. En este año, celebramos además el 160 aniversario del modelo propuesto por August Kekulé para explicar su estructura. La fusión de bencenos entre sí llevó al desarrollo de la química de los hidrocarburos aromáticos policíclicos, donde la regla del sextete, con Erich Clar como fundador, resulta aún indispensable en el desarrollo de moléculas π -conjugadas. La fusión de anillos de benceno tiene su mayor representante en el grafeno, inicialmente hipotetizado por Wallace, y aislado en 2004 por Konstantin Novoselov y Andre Geim. Esta estructura formada por una monocapa bidimensional de anillos de benceno fusionados da lugar a una combinación de propiedades eléctricas, mecánicas y ópticas únicas.

Inspirados en esta red bidimensional infinita de anillos de benceno y en conjunción con las estrategias sintéticas *bottom-up*, los nanografenos (NGs) surgen como análogos finitos de dicho alótropo. Es a partir de los trabajos pioneros de

Erich Clar y Klaus Müllen cuando los NGs se convierten en bloques sintéticos fundamentales para diseñar modelos grafénicos a medida y poder así explorar propiedades optoelectrónicas novedosas.

Siendo el benceno la unidad estructural básica en la construcción de nanografenos, el hexa-peri-hexabenzocoroneno (HBC) puede considerarse la unidad hexagonal de construcción básica para sistemas de mayor tamaño, sería el denominado "superbenceno" tal y como lo definió K. Müllen (Figura 1).^[1] Según esta denominación, la fusión de unidades de "superbenceno" daría lugar a los homólogos denominados "supeacenos" como el "superantaftaleno", "supertrifenileno" o "superfenalenilo" (Figura 1).

Siguiendo esta misma analogía, surge la familia de los "superhelicos", donde las unidades de HBC (superbenceno) se disponen de manera helicoidal, dando lugar a helicos con mayor conjugación π (Figura 1).^[2-4] Es gracias a esta quiralidad inherente y a la extensa conjugación electrónica presente, cuando surgen propiedades únicas y diferentes de los sistemas planos o de los helicos sencillos no extendidos.

En NGs quirales, la interacción con luz circularmente polarizada permite estudiar tanto la quiralidad del estado fundamental como la del estado excitado. La absorción preferencial entre luz

CÓMO CITAR: J. L. Paez, L. Hortigüela, C. M. Cruz, A. G. Campaña. An. Quím. RSEQ 2025, 121, 302-307, <https://doi.org/10.62534/rseq.aq.2097>

* C-e: araceliga@ugr.es

Manuscrito recibido: 27/11/2025 · aceptado: 09/12/2025

circularmente polarizada a la izquierda o a la derecha se mide mediante dicroísmo circular (CD), cuantificado por el factor de disimetría de absorción (g_{abs}). De manera análoga, la luminiscencia circularmente polarizada (CPL) se evalúa mediante el factor de disimetría de emisión (g_{lum}). Los factores de disimetría dependen de la simetría molecular, los momentos dipolares eléctricos y magnéticos de la transición electrónica, y el ángulo entre ellos. Valores grandes de g que indican fuerte discriminación quiral. A efectos prácticos, un buen valor de g_{lum} requiere a su vez de un buen rendimiento cuántico de fluorescencia. Así surge un nuevo parámetro para evaluar de forma integral la eficiencia de CPL, el brillo CPL (B_{CPL}), que combina la absorción, la emisión y la fluorescencia, ofreciendo un índice más completo para aplicaciones prácticas de emisores quirales. Combinando las propiedades electrónicas del grafeno con la actividad quiral, los NGs quirales afloran como candidatos prometedores para el desarrollo de dispositivos optoelectrónicos y OLEDs.

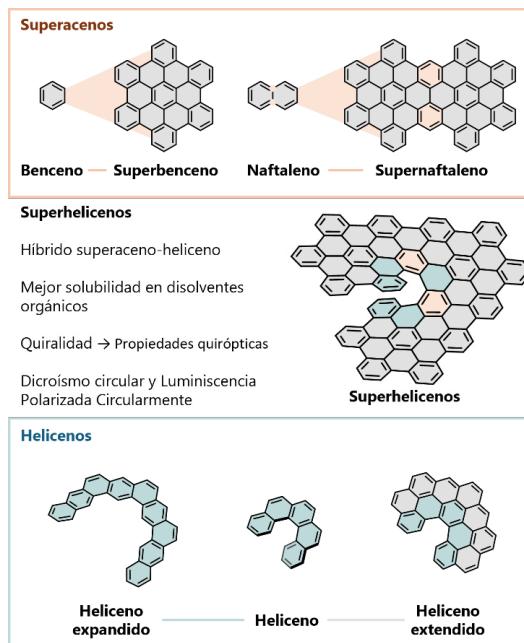


Figura 1. Características generales de los superacenos, helicenos y superhelicenos.

En los últimos años, este campo se ha orientado hacia el diseño de nanografenos modificados incluyendo heteroátomos o sistemas curvos incorporando anillos no hexagonales, dando lugar a aplicaciones en campos tan amplios como sensores, electrónica orgánica, semiconductores, bioimagen o cifrado óptico.^[5]

A continuación, se recogen algunos ejemplos representativos de "superhelicenos" sintetizados mediante metodologías *bottom-up* y que presentan CPL.

Diseño y estrategias de síntesis de superhelicenos quirales

La síntesis de NGs quirales requiere de un control del tamaño, bordes y forma del sistema aromático policíclico, así como de la introducción de quiralidad. La inducción de quiralidad se logra gracias al fuerte impedimento estérico provocado por la proximidad de diferentes átomos o grupos. Las dos estrategias más utilizadas para generar este impedimento son: *i)* la inserción de grupos voluminosos, como el grupo *terc*-butilo o grupos aromáticos grandes, en posiciones específicas del pe-

rímetro del NG, para así forzar a la molécula a romper la planicidad y *ii)* la fusión de anillos para generar helicenos o espirales helicoidales en la propia estructura. En el caso de los *superhelicenos*, estos se construyen mediante la fusión de una o más unidades de hexa-*peri*-hexabenzocoroneno (HBC) con uno o varios carbohelicenos.

A continuación, se incluyen algunos ejemplos seleccionados de NGs curvos emisores de CPL, clasificados dependiendo del número de unidades de HBCs presentes.

Superhelicenos con una unidad de HBC

El representante más sencillo de esta familia es el compuesto **1** (Figura 2).^[6,7] Dicho carbo[5]heliceno incrustado en la estructura de un HBC presenta un rendimiento cuántico de fluorescencia (Φ_F) de 0.11 y un valor de $|g_{\text{lum}}| = 1 \times 10^{-3}$. Con la extensión de dicho heliceno ([7]heliceno para el compuesto **2** y [9]heliceno para el compuesto **3**) se han observado incrementos en los valores de Φ_F (0.25 y 0.44, respectivamente) (Figura 2).^[8]

Sin embargo, la inserción de un mayor número de helicenos en estas estructuras no siempre conlleva un incremento del valor de g_{lum} , ya que existen casos reportados en los que este valor es incluso menor, en comparación con sus análogos con una sola hélice.^[9,10] En contraposición, una estrategia que sí ha mostrado incrementar la señal de CPL es la modificación de la topología del HBC.^[11]

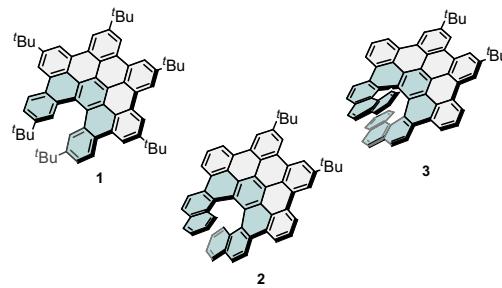


Figura 2. Nanografenos emisores de CPL con una sola unidad de HBC.

Superhelicenos con dos unidades de HBC

La siguiente familia de compuestos es aquella en la que dos unidades de HBC están conectadas por un heliceno central. Los primeros representantes de este grupo son los NGs tipo bicapa reportados, primeramente, por el grupo de Nazario Martín y posteriormente por los grupos de Xinliang Feng y Ji Ma.^[12,13] Esta familia se caracteriza por presentar dos unidades de HBC conectadas por carbohelicenos de diferente longitud ([7]heliceno para **4**, [9]heliceno para **5**, [10]heliceno para **6** y [11]heliceno para **7**) (Figura 3). El compuesto **5** es el que mostró un valor notablemente alto de $|g_{\text{lum}}|$ de 3.6×10^{-2} a 575 nm. Este hecho muestra que en un [9]heliceno, la superposición y distancia entre las dos unidades de HBC es la óptima para maximizar el valor de g_{lum} en un sistema tipo bicapa.

Adicionalmente, se han estudiado sistemas basados en dos unidades de HBC en los cuales la quiralidad se introduce mediante unidades basadas en carbonos sp^3 . El compuesto **8** utiliza un triptícano como conector de las dos unidades de HBC para dar lugar a un NG quiral que muestra un valor de $|g_{\text{lum}}| = 1 \times 10^{-3}$.^[14] Otro ejemplo interesante es la utilización de la unidad de triíndano como conector quiral de dos HBC.^[15] En este caso, además se consiguió por primera vez llevar a cabo una reacción de Scholl enantioespecífica, con la unidad de triíndano como auxiliar quiral, para generar el compuesto

9 (Figura 3). Este compuesto con tres carbonos asimétricos y dos carbo[5]helicenos mostró valores de $|g_{\text{lum}}| = 1.9 \times 10^{-3}$ y de $B_{\text{CPL}} = 16.7 \text{ M}^{-1} \text{ cm}^{-1}$.

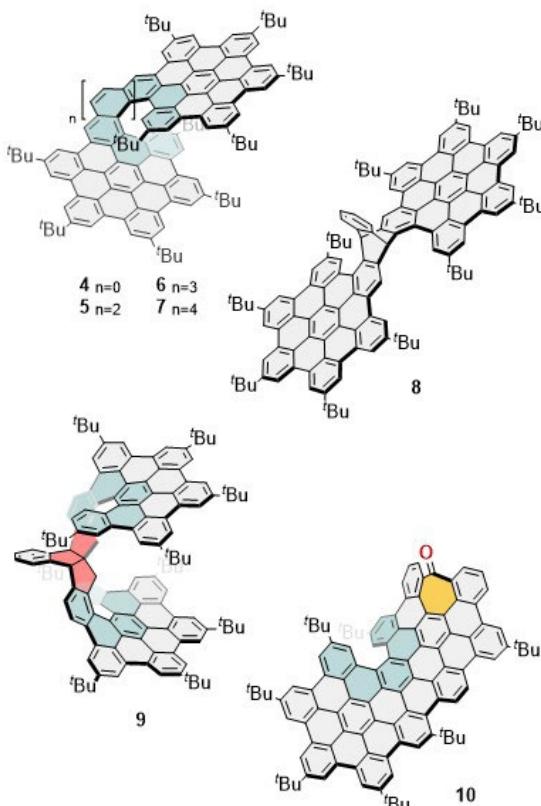


Figura 3. NGs emisores de CPL puramente carbonados que contienen dos unidades de HBC.

En 2018, nuestro grupo presentó la síntesis del primer NG quirial emisor de CPL.^[16] Este NG con forma de cinta helicoidal, **10** (Figura 3), presenta dos unidades de HBC conectadas por un [5]heliceno y con curvatura negativa derivada de la inclusión de un anillo heptagonal en la periferia de uno de los HBC. Su respuesta de CPL estaba centrada en 560 nm con un valor de $|g_{\text{lum}}| = 0.23 \times 10^{-3}$.

También cabe destacar la incorporación de heteroátomos para modular las propiedades quirópticas de estos NGs quirales. En este sentido, la inserción de una unidad de carbazol, **11a** (Figura 4), dio lugar a desplazamientos de fluorescencia hacia el rojo ($\lambda_{\text{em}} = 542 \text{ nm}$ y $\Phi_F = 0.75$) con valor de $|g_{\text{lum}}| = 1.1 \times 10^{-3}$.^[17]

El término superheliceno fue acuñado por Norbert Jux en la síntesis del NG **12**, incorporando una unidad de furano. La inserción de átomos de oxígeno da lugar a una disminución de la respuesta de CPL en comparación con los análogos puramente carbonados. Concretamente, para los compuestos **12** ($|g_{\text{lum}}| = 0.3 \times 10^{-3}$) y **13** ($|g_{\text{lum}}| = 2.6 \times 10^{-3}$) (Figura 4) se observan valores menores respecto a sus análogos **4** y **5**, respectivamente.^[4,18] Un fenómeno reseñable en **12** fue la amplificación de la respuesta de CPL en 500 veces cuando el compuesto se incorpora en una matriz aquiral de polidiocitifluoreno (PFO) presentada por el grupo de Matthew J. Fuchter, efecto que se explicó mediante una transferencia de energía de resonancia tipo Förster (FRET).

Finalmente, el compuesto **14** (Figura 4) constituye otro representante de esta familia, en el que dos unidades de HBC se conectan a través de una unidad de BINOL. El compuesto **14** exhibe valores de $|g_{\text{lum}}| = 0.23 \times 10^{-3}$.^[19]

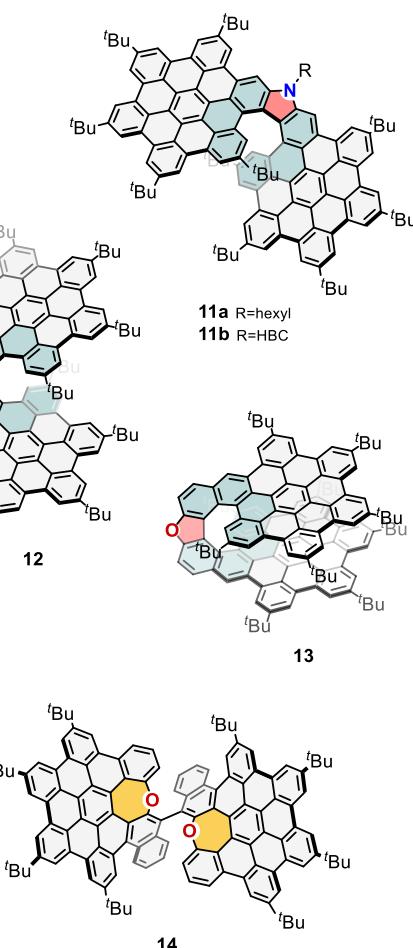


Figura 4. Nanografenos emisores de CPL contenido dos unidades de HBC y dopados con heteroátomos.

Superhelicenos con tres unidades de HBC

A medida que se aumenta el número de unidades de HBC surgen mayores posibilidades respecto a la topología del NG quirial. Es el caso de los compuestos **15**, **16** y **17** (Figura 5).^[12,20] Estos NGs, constituidos por tres unidades de HBC, presentan una disposición relativa *ortho*-, *para*- y *meta*-, haciendo posible una modulación del g_{lum} y por tanto la respuesta de CPL. Para **15** y **17**, se reportaron valores de $|g_{\text{lum}}| = 2.7 \times 10^{-3}$ y 8.7×10^{-3} , respectivamente. Sin embargo, fue la disposición relativa *para*- la que mostró mejores valores de respuesta de CPL ($|g_{\text{lum}}| = 13.2 \times 10^{-3}$ y $B_{\text{CPL}} = 176 \text{ M}^{-1} \text{ cm}^{-1}$). Esto es debido a que esta disposición geométrica optimiza el ángulo entre los momentos dipolares eléctrico y magnético de las transiciones involucradas.

Nuestro grupo también ha contribuido en el aumento del número de HBCs en superhelicenos que emiten CPL con los compuestos **18** y **19** (Figura 5), los cuales presentan tres unidades de HBC. Además, se incorpora curvatura adicional derivada de anillos de siete miembros presentes en la periferia.^[3,21] Estos NGs quirales helicoidales mostraron valores de $|g_{\text{lum}}|$ de 2×10^{-3} y 3×10^{-3} , para **18** y **19** respectivamente. En particular, el compuesto **19** mostró una emisión desplazada al rojo, debido a la estructura helicoidal junto a la curvatura negativa de tipo silla de montar generada por la presencia de los anillos heptagonales.

Finalmente, el dopaje con heteroátomos también está presente en estos análogos de mayor tamaño. Concretamente, el NG

helicoidal **11b** (Figura 4), que presenta una unidad de carbazol sustituida con un HBC presenta una emisión desplazada al rojo (595 nm), al igual que el análogo **11**, y valores de respuesta de CPL dependientes del disolvente. ($|g_{\text{lum}}| = 1.3 \times 10^{-3}$ en MeCN).^[22]

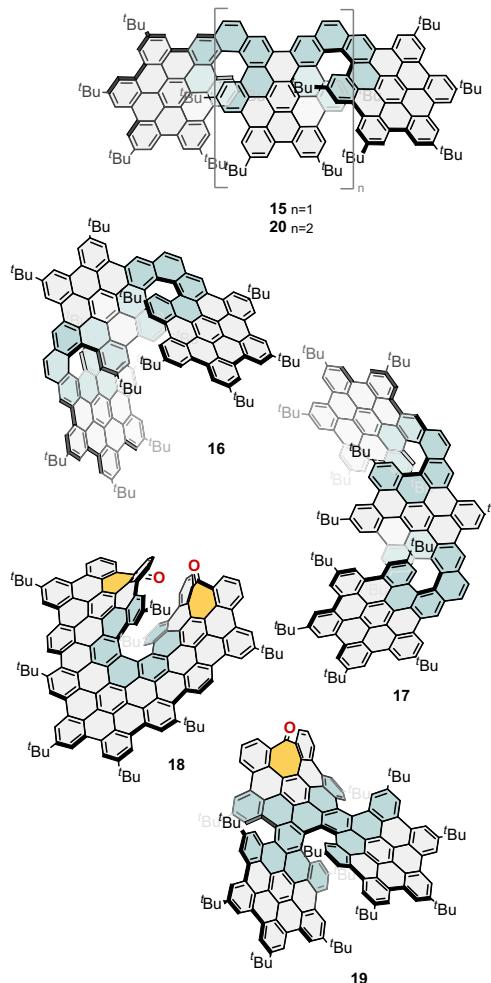


Figura 5. Nanografenos emisores de CPL conteniendo tres unidades de HBC.

Superhelicenos con cuatro o más unidades de HBC

También se han presentado sistemas de mayor tamaño y mayor complejidad, como los compuestos **20**, **21**, **22** y **23** (Figura 6), al contener múltiples unidades de HBC (cuatro o más) en conjunción con uno o varios helicenos simples o extendidos. El compuesto **20**, a pesar de su alta π -extensión y Φ_{P} , presenta un valor bajo de $|g_{\text{lum}}| = 1.5 \times 10^{-3}$, lo que pone de manifiesto que un mayor número de helicenos o una mayor complejidad estructural no siempre deriva en una mejora de la respuesta de CPL.^[23,24]

En los compuestos **21** y **22** se explora en profundidad la influencia de la extensión lateral del sistema π . Para el compuesto **21**, la extensión del heliceno central con cuatro unidades de HBC resultó en un desplazamiento de la emisión al infrarrojo cercano (600-900 nm), con valores de ($|g_{\text{lum}}| = 4.5 \times 10^{-2}$ y $B_{\text{CPL}} = 304 \text{ M}^{-1} \text{ cm}^{-1}$). En contraposición, el compuesto **22**, incorpora una unidad de HBC adicional, dando lugar a un NG helicoidal en forma de W, que presenta valores de g_{lum} menores (4.0×10^{-3}) poniendo de manifiesto de nuevo la baja correlación entre el número de unidades helicénicas y la respuesta quirótica. Otro

ejemplo de NG quiral de alta complejidad estructural lo podemos encontrar en el compuesto **23**, reportado por nuestro grupo.^[25] Este NG distorsionado presenta cuatro unidades de HBC, múltiples anillos heptagonales y tres helicenos extendidos. Esta estructura altamente compleja dio lugar a una mezcla de diastereoisómeros con valores de g_{lum} modestos ($0.2-0.3 \times 10^{-3}$). En resumen, el comportamiento de estos NG complejos confirma que la intensa respuesta de CPL reside en un diseño geométrico racional donde la alineación de los momentos dipolares eléctricos y magnéticos sea óptima, en lugar de aumentar el número de unidades de HBC o la complejidad molecular sin un diseño previo.

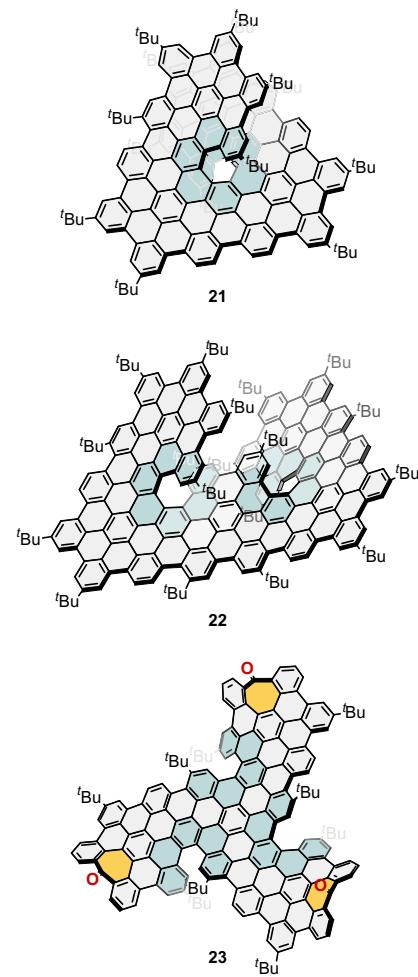


Figura 6. Nanografenos emisores de CPL conteniendo cuatro o más unidades de HBC.

Conclusiones

En este punto, las perspectivas de futuro en el campo de los NGs quirales se centran en superar obstáculos tales como el desarrollo de síntesis enantioselectivas eficaces, la optimización de las propiedades quiróticas y la integración eficaz en materiales funcionales. Por un lado, la mayor parte de las metodologías actuales requieren de la separación de mezclas racémicas, limitando en gran medida la escalabilidad y rendimiento de las rutas de síntesis. Por tanto, el desarrollo de metodologías catalíticas y/o enantioselectivas es crucial para el mejor control de la quiralidad y eficiencia de la ruta sintética. Trabajos recientes están demostrando el gran potencial de este tipo de aproximaciones.^[7,15,18]

Por otro lado, la optimización y mejora de las propiedades quirópticas requiere de una comprensión profunda entre la estructura molecular, las transiciones electrónicas y el factor de disimetría g_{lum} . En diversos trabajos se ha demostrado que un ajuste racional de los momentos dipolares eléctrico y magnético, así como de la orientación entre ellos, es fundamental para incrementar notablemente la respuesta quiral.^[26-28] En esta tesis, las herramientas de aprendizaje automático y los métodos computacionales surgen como recursos valiosos para predecir y optimizar estos parámetros mediante la correlación de diferentes motivos estructurales con dichos momentos dipolares.

En conclusión, alcanzar un compromiso eficiente entre altos valores de rendimiento de fluorescencia y factores de disimetría requiere de un diseño molecular inteligente. Los enfoques interdisciplinares que aúnén la síntesis química, la modelización teórica y la ciencia de materiales serán fundamentales para el desarrollo de la siguiente generación de materiales quirales basados en NGs con aplicaciones en electrónica y fotónica.

No obstante, no podemos olvidar que la creación y el control de la quiralidad en materiales basados en el carbono resulta apasionante simplemente desde el punto de vista estructural. Celebrar el 200 aniversario del descubrimiento del benceno o el 20 aniversario del aislamiento del grafeno, nos sirve de recordatorio del potencial único de la curiosidad científica y la investigación básica, pudiendo llegar a grandes revoluciones tecnológicas.

Bibliografía

- [1] V. S. Iyer, M. Wehmeier, J. D. Brand, M. A. Keegstra, K. Müllen, *Angew. Chem., Int. Ed.* **1997**, 36, 1604-1607, <https://doi.org/10.1002/anie.199716041>.
- [2] D. Reger, P. Haines, K. Y. Amsharov, J. A. Schmidt, T. Ullrich, S. Bönisch, F. Hampel, A. Görling, J. Nelson, K. E. Jelfs, D. M. Guldi, N. Jux, *Angew. Chem., Int. Ed.* **2021**, 60, 18073-18081, <https://doi.org/10.1002/anie.202103253>.
- [3] C. M. Cruz, S. Castro-Fernández, E. Maçôas, J. M. Cuerva, A. G. Campaña, *Angew. Chem., Int. Ed.* **2018**, 57, 14782-14786, <https://doi.org/10.1002/anie.201808178>.
- [4] D. Reger, P. Haines, F. W. Heinemann, D. M. Guldi, N. Jux, *Angew. Chem., Int. Ed.* **2018**, 57, 5938-5942, <https://doi.org/10.1002/anie.201800585>.
- [5] J. Lión-Villar, J. M. Fernández-García, S. Medina Rivero, J. Perles, S. Wu, D. Aranda, J. Wu, S. Seki, J. Casado, N. Martín, *Nat. Chem.* **2025**, 17, 1099-1106, <https://doi.org/10.1038/s41557-025-01810-2>.
- [6] M. M. Martin, F. Hampel, N. Jux, *Chem. - Eur. J.* **2020**, 26, 10210-10212, <https://doi.org/10.1002/chem.202001471>.
- [7] F. Morita, Y. Kishida, Y. Sato, H. Sugiyama, M. Abekura, J. Nogami, N. Toriumi, Y. Nagashima, T. Kinoshita, G. Fukuhara, M. Uchiyama, H. Uekusa, K. Tanaka, *Nat. Synth.* **2024**, 3, 774-786, <https://doi.org/10.1038/s44160-024-00527-3>.
- [8] Z. Qiu, C. W. Ju, L. Frédéric, Y. Hu, D. Schollmeyer, G. Pieters, K. Müllen, A. Narita, *J. Am. Chem. Soc.* **2021**, 143, 4661-4667, <https://doi.org/10.1021/jacs.0c13197>.
- [9] Y. Ma, L. Zhou, J. Tan, W. Sun, Y. Zou, Y. Hu, *Adv. Optical Mater.* **2025**, 13, 2402446, <https://doi.org/10.1002/adom.202402446>.
- [10] R. Yamano, Y. Shibata, K. Tanaka, *Chem. - Eur. J.* **2018**, 24, 6364-6370, <https://doi.org/10.1002/chem.201706008>.
- [11] G. Huo, W. Xu, J. Hu, Y. Han, W. Fan, W. Wang, Z. Sun, H. Yang, J. Wu, *Angew. Chem., Int. Ed.* **2025**, 64, e202416707, <https://doi.org/10.1002/anie.202416707>.
- [12] W. Niu, Y. Fu, Z.-L. Qiu, C. J. Schürmann, S. Obermann, F. Liu, A. A. Popov, H. Komber, J. Ma, X. Feng, *J. Am. Chem. Soc.* **2023**, 145, 26824-26832, <https://doi.org/10.1021/jacs.3c01088>.
- [13] P. Izquierdo-García, J. M. Fernández-García, S. Medina Rivero, M. Šámal, J. Rybáček, L. Bednárová, S. Ramírez-Barroso, F. J. Ramírez, R. Rodríguez, J. Perles, D. García-Fresnadillo, J. Crassous, J. Casado, I. G. Stará, N. Martín, *J. Am. Chem. Soc.* **2023**, 145, 11599-11610, <https://doi.org/10.1021/jacs.3c01088>.
- [14] Y. Wada, K. Shinohara, T. Ikai, *Chem. Commun.* **2019**, 55, 11386-11389, <https://doi.org/10.1039/C9CC06025A>.
- [15] M. Buendía, J. M. Fernández-García, J. Perles, S. Filippone, N. Martín, *Nat. Synth.* **2024**, 3, 545-553, <https://doi.org/10.1038/s44160-024-00484-x>.
- [16] C. M. Cruz, I. R. Márquez, I. F. A. Mariz, V. Blanco, C. Sánchez-Sánchez, J. M. Sobrado, J. A. Martín-Gago, J. M. Cuerva, E. Maçôas, A. G. Campaña, *Chem. Sci.* **2018**, 9, 3917-3924, <https://doi.org/10.1039/C8SC00427G>.
- [17] V. Kumar, G. Venugopal, A. B. Jadhav, S. D. Dongre, R. Gonade, J. Kumar, P. C. Ruer, B. Hupp, A. Steffen, S. S. Babu, *Angew. Chem., Int. Ed.* **2025**, 64, <https://doi.org/10.1002/anie.202422125>.
- [18] P. Izquierdo-García, J. M. Fernández-García, J. Perles, N. Martín, *J. Am. Chem. Soc.* **2024**, 146, 34943-34949, <https://doi.org/10.1021/jacs.4c14544>.
- [19] S. Li, R. Li, Y. K. Zhang, S. Wang, B. Ma, B. Zhang, P. An, *Chem. Sci.* **2023**, 14, 3286-3292, <https://doi.org/10.1039/D2SC06244E>.
- [20] W. Niu, Y. Fu, Q. Deng, Z. L. Qiu, F. Liu, A. A. Popov, H. Komber, J. Ma, X. Feng, *Angew. Chem., Int. Ed.* **2024**, 63, e202319874, <https://doi.org/10.1002/anie.202319874>.
- [21] S. Míguez-Lago, I. F. A. Mariz, M. A. Medel, J. M. Cuerva, E. Maçôas, C. M. Cruz, A. G. Campaña, *Chem. Sci.* **2022**, 13, 10267-10272, <https://doi.org/10.1039/D2SC03452B>.
- [22] X. Y. Wang, J. Bai, Y. J. Shen, Z. A. Li, H. Y. Gong, *Angew. Chem., Int. Ed.* **2025**, 64, e202417745, <https://doi.org/10.1002/anie.202417745>.
- [23] K.-L. Zhu, Z.-A. Li, J. Liang, K.-L. Zou, Y.-J. Shen, H.-Y. Gong, K. Zhu, Z. Li, J. Liang, K. Zou, Y. Shen, H. Gong, *Angew. Chem., Int. Ed.* **2024**, 63, e202409713, <https://doi.org/10.1002/anie.202409713>.
- [24] Y.-J. Shen, L.-J. Peng, L.-N. Diao, N.-T. Yao, W.-K. Chen, Y. Yang, M. Qiu, W.-X. Zhu, X. Li, X.-Y. Wang, H.-Y. Gong, *Org. Lett.* **2024**, 26, 7279-7284, <https://doi.org/10.1021/acs.orglett.4c02093>.
- [25] C. M. Cruz, I. R. Márquez, S. Castro-Fernández, J. M. Cuerva, E. Maçôas, A. G. Campaña, *Angew. Chem., Int. Ed.* **2019**, 58, 8068-8072, <https://doi.org/10.1002/anie.201902529>.
- [26] R. G. Uceda, C. M. Cruz, S. Míguez-Lago, L. Á. de Cienfuegos, G. Longhi, D. A. Pelta, P. Novoa, A. J. Mota, J. M. Cuerva, D. Miguel, *Angew. Chem., Int. Ed.* **2024**, 63, e202316696, <https://doi.org/10.1002/anie.202316696>.
- [27] R. G. Uceda, A. Gijón, S. Míguez-Lago, C. M. Cruz, L. Álvarez de Cienfuegos, A. J. Mota, D. Miguel, J. M. Cuerva, *ChemPhotoChem* **2025**, 9, e202500079, <https://doi.org/10.1002/cptc.202500079>.
- [28] R. G. Uceda, A. Gijón, S. Míguez-Lago, C. M. Cruz, V. Blanco, F. Fernández-Álvarez, L. Álvarez de Cienfuegos, M. Molina-Solana, J. Gómez-Romero, D. Miguel, A. J. Mota, J. M. Cuerva, *Angew. Chem., Int. Ed.* **2024**, 63, e202409998, <https://doi.org/10.1002/ange.202409998>.

José Luis Páez Castañeda

Departamento de Química Orgánica, Unidad de Excelencia de Química (UEQ), Facultad de Ciencias, Universidad de Granada. Avda. Fuente Nueva s/n, 18071 Granada, España
C.e: joseluispc@ugr.es
ORCID: 0009-0005-8904-5479

Investigador Predoctoral en el Departamento de Química Orgánica de la Universidad de Granada. Obtuvo su Grado (2021) y su máster (2023) en Química en la Universidad de Granada bajo la supervisión del Prof. Juan M. Cuerva y el Dr. Carlos M. Cruz. Se incorporó al grupo MORReFUN en 2023 como estudiante de doctorado bajo la supervisión del Dr. Carlos M. Cruz y la Prof. Araceli G. Campaña financiado por una beca predoctoral FPI del MICIU/AEI/ESF+.

Lidia Hortigüela Vázquez

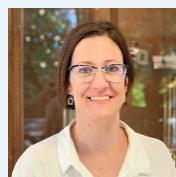
Departamento de Química Orgánica, Unidad de Excelencia de Química (UEQ), Facultad de Ciencias, Universidad de Granada. Avda. Fuente Nueva s/n, 18071 Granada, España
C.e: lidiavh@ugr.es
ORCID: 0000-0001-5057-5599

Investigadora predoctoral en el Departamento de Química Orgánica de la Universidad de Granada. Obtuvo el Grado en Química en la Universidad de Burgos (2019) y el Máster en Química en la Universidad de Granada (2021). Se incorporó al grupo MORReFUN en 2022 como estudiante de doctorado bajo la supervisión de la Prof. Araceli G. Campaña y la Prof. Sara P. Morcillo Martínez financiada por una beca predoctoral de la Junta de Andalucía

Carlos Moreno Cruz

Departamento de Química Orgánica, Unidad de Excelencia de Química (UEQ), Facultad de Ciencias, Universidad de Granada. Avda. Fuente Nueva s/n, 18071 Granada, España
C.e: cmorenco@ugr.es
ORCID: 0000-0002-0676-5210

Investigador Ramón y Cajal en el Departamento de Química Orgánica de la Universidad de Granada y líder del equipo SPIRANT dentro del Grupo MORReFUN. Obtuvo su doctorado en 2020 bajo la supervisión de la Prof. Araceli G. Campaña y el Prof. Juan M. Cuerva. Se incorporó al grupo del Prof. Michal Juriček en la Universidad de Zúrich como investigador postdoctoral antes de ser nombrado investigador postdoctoral de la Junta de Andalucía en 2022 en la Universidad de Granada y posteriormente investigador RyC desde 2025.

Araceli González Campaña

Departamento de Química Orgánica, Unidad de Excelencia de Química (UEQ), Facultad de Ciencias, Universidad de Granada. Avda. Fuente Nueva s/n, 18071 Granada, España
C.e: araceligc@ugr.es
ORCID: 0000-0001-5483-5642

Profesora Titular del Departamento de Química Orgánica de la Universidad de Granada, donde dirige el equipo NanographOUT dentro del Grupo MORReFUN. Obtuvo su doctorado en Química por la UGR en 2008 bajo la supervisión del Prof. Juan M. Cuerva y el Prof. J. Enrique Oltra. Tras realizar investigaciones posdoctorales en la Universidad Autónoma de Madrid (grupo del Prof. Diego J. Cárdenas) y en la Universidad de Edimburgo (grupo del Prof. David A. Leigh), ocupó el puesto de investigadora Ramón y Cajal en la UGR antes de asumir su actual cargo académico en 2020.

