

Investigadores menores de 35

Jorge Albalad



Posición: Investigador Ramón y Cajal

Entidad: Departament de Química, Facultat de Ciències, Universitat Autònoma de Barcelona. Catalan Institute of Nanoscience and Nanotechnology (ICN2), CSIC and The Barcelona Institute of Science and Technology, Campus UAB.

ORCID: 0000-0001-5850-6723

Formación: Grado en Química (UAB) / Máster en Química Industrial e Investigación (UAB) / Doctorado en Química (UAB/ICN2)

Líneas de Investigación: materiales reticulares, redes metalorgánicas (MOFs), redes orgánicas covalentes (COFs), modificación post-sintética, Química de Recorte (Clip-off Chemistry).

Aficiones: cocina, dibujo, lectura, videojuegos, gimnasio.

Perfil personal del investigador

Desarrollo metodologías sintéticas y post-sintéticas para materiales reticulares y porosos, con control estructural a escala atómica. Estas estrategias permiten acceder a nuevas arquitecturas moleculares y extendidas, más allá de lo que ofrecen los enfoques y técnicas de diseño convencionales.

Ciencia en lo cotidiano

Mi ejemplo favorito de química/ciencia en la vida diaria es la reacción de Maillard, que cambia el color, textura y sabor de los alimentos tras aplicarles calor de forma controlada.

La aplicación más importante de mi investigación será el diseño de nuevas metodologías sintéticas que permitan crear materiales funcionales previamente inaccesibles.

Mi momento favorito del día para pensar ciencia es durante el primer café del día, para empezar con las ideas ordenadas.

Un concepto que me obsesiona (en el buen sentido) es que los defectos en los materiales no son imperfecciones, sino que a menudo son los responsables de sus propiedades y aplicaciones más perfectas.

Cómo se hace la ciencia

Lo que más disfruto en el laboratorio es usar y manipular nitrógeno líquido. Por muchas veces que lo use, siempre pienso que es demasiado divertido para ser trabajo.

Una habilidad "invisible pero clave para investigar" es la capacidad de reinterpretar los resultados inesperados, y encontrar valor en los errores.

Lo que más valoro de mi grupo/equipo es su disposición a probar cosas nuevas. En lugar de responder con un "no", la reacción habitual es "¿cuándo empezamos?".

Estoy más orgulloso/a al ver crecer a los estudiantes. En poco tiempo pasan de necesitar ayuda constante a convertirse en profesionales independientes.

No puedo resistirme a un café más. Es en esos momentos cuando mi mente parece funcionar mejor.

Recargo energía con trasnochando. Largas noches sin alarmas, ruido, ni obligaciones.

Si no fuera científico sería Chef

Una frase que me guía es "No esperes, nunca va a ser el momento oportuno. Comienza en cualquier lugar, con los medios a tu disposición, y encontrarás el camino".

Una idea para llevarse a casa: "Si haces lo que siempre has hecho, obtendrás lo que siempre obtuviste. Los grandes logros comienzan fuera de tu zona de confort".

Presentación de su artículo

En las últimas décadas, los materiales reticulares como los MOFs y COFs han pasado de ser una curiosidad académica a ocupar un lugar central en la química de materiales. Sus propiedades más atractivas, como su elevada porosidad, son en realidad consecuencia directa de su rasgo más distintivo: la posibilidad de diseñar y construir sus estructuras con precisión a escala atómica y molecular. En este artículo, se reflexiona sobre por qué este campo ha merecido reconocimiento al más alto nivel y cómo el control sintético y post-sintético abre la puerta a materiales verdaderamente programables.

Materiales reticulares: cuando la química molecular se vuelve programable en el espacio

Reticular materials: when molecular chemistry becomes programmable in space

Jorge Albalad

Departament de Química, Facultat de Ciències, Universitat Autònoma de Barcelona. Catalan Institute of Nanoscience and Nanotechnology (ICN2), CSIC and The Barcelona Institute of Science and Technology, Campus UAB.

PALABRAS CLAVE:

Química reticular
Redes metalorgánicas
Redes orgánicas covalentes
Control sintético
Modificación post-sintética

RESUMEN:

La química reticular, representada principalmente por los MOFs y COFs, ha transformado la química de materiales al permitir el diseño de redes cristalinas con precisión atómica y molecular. Su naturaleza modular, junto con el control sintético y post-sintético de sus estructuras, convierte a estos materiales en plataformas altamente versátiles para ajustar de forma dirigida sus propiedades físicas y químicas. Este artículo de opinión presenta al lector una visión general de cómo estos avances han impulsado el paso desde materiales cuya estructura se observa hacia materiales cuya función puede diseñarse desde su síntesis.

KEYWORDS:

Reticular chemistry
Metal-Organic Frameworks (MOFs)
Covalent Organic Frameworks (COFs)
Synthetic control
Post-synthetic modification

ABSTRACT:

Reticular chemistry, mainly represented by MOFs and COFs, has transformed materials chemistry by enabling the design of crystalline frameworks with atomic and molecular precision. Their modular nature, together with the synthetic and post-synthetic control over their structures, makes these materials highly versatile platforms, with directed tuning over their physical and chemical properties. This opinion article provides an overview of how these advances have driven the transition from materials whose structure is merely observed to materials whose function can be designed from their synthesis.

Introducción

Durante décadas, la química de materiales avanzó bajo una premisa implícita: que la complejidad estructural de un material emerge, en gran medida, de manera difícilmente predecible.^[1] Desde cerámicas y semiconductores hasta polímeros amorfos, el control de la arquitectura tridimensional era más aspiracional que sistemático.^[2-6] Sin embargo, el descubrimiento de los materiales reticulares, en particular las redes metalorgánicas y covalentes (del inglés *metal-organic frameworks* (MOFs)^[7,8] y *covalent organic frameworks* (COFs)^[9]), transformó completamente esta narrativa.

El concepto central detrás de estos materiales, la química reticular, se basa en la construcción de redes extendidas y potencialmente porosas a partir de unidades moleculares definidas, cuya conectividad determinan la arquitectura final.^[10,11] De este modo, la estructura final no emerge como algo independiente a sus componentes, sino como el resultado directo de su elección y como estos se enlazan en el espacio.^[12-14] No es casualidad que el desarrollo de la química reticular, fundado principalmente por el Prof. Robson y expandido por los Prof. Kitagawa y Yaghi entre otros, haya sido reconocido recientemente con el Premio Nobel de Química de 2025.^[15-18] Más que premiar una familia concreta de materiales, este reconocimiento valida un

cambio de perspectiva: el paso desde materiales cuya estructura se observa o se interpreta, hacia sólidos cuya naturaleza química, física y estructural puede planificarse a través de sus bloques constituyentes.

¿Qué son realmente los MOFs y COFs?

Dentro de los materiales reticulares, los MOFs y COFs representan dos de las plataformas más exploradas y versátiles. Aunque ambos comparten la idea fundamental de construir redes extendidas a partir de bloques moleculares, la naturaleza de sus componentes y, por tanto, muchas de sus propiedades, son diferentes.

Los MOFs están formados por la combinación de nodos metálicos y ligandos orgánicos multitópicos, unidos mediante enlaces de coordinación. Esta combinación permite generar estructuras altamente porosas, cristalinas y con una enorme diversidad estructural.^[7,19] La presencia de un componente metálico en la estructura no solo aporta robustez, sino también funcionalidad adicional, especialmente en catálisis, adsorción selectiva de gases, o procesos redox.^[20-23]

Por otro lado, los COFs son materiales análogos que no tienen unidades metálicas, y se construyen exclusivamente a partir de componentes orgánicos unidos mediante enlaces

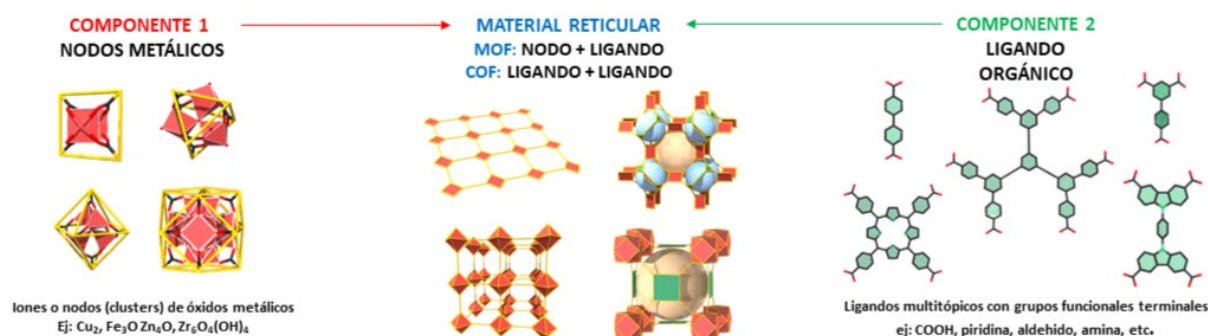


Figura 1. Representación esquemática del diseño estructural de materiales reticulares. A través de la selección de componentes moleculares de geometría y química definida, se puede planificar la estructura y propiedades del material.

covalentes reversibles (imina, boronato, ester borónico, etc.).^[24] Citando al Prof. O. M. Yaghi de forma especialmente acertada: "Si no necesitas el metal, el mejor MOF es un COF". En estos materiales, la geometría de ambos componentes está completamente preorganizada desde el diseño molecular, lo que permite un control aún más directo sobre la arquitectura final y suele traducirse en materiales más ligeros, químicamente robustos, y especialmente atractivos para aplicaciones en separación, membranas, y procesos medioambientales o biológicos incompatibles con unidades metálicas.^[25-31]

En ambos casos, su gran ventaja reside en que la estructura no se descubre, sino que se diseña. En consecuencia, esta química permite diseñar materiales optimizados para la aplicación que se persigue. La posibilidad de elegir los componentes y controlar cómo se enlazan en el espacio, junto a la capacidad de modificar químicamente la red una vez formada, permite ajustar de manera precisa sus propiedades físicas y químicas. De este modo, el desarrollo de materiales deja de estar condicionado por limitaciones sintéticas y pasa a orientarse hacia el cumplimiento de objetivos funcionales definidos.^[32]

Del concepto al material: Control sintético

Los materiales reticulares tradicionalmente se han obtenido mediante síntesis solvotermales, en las que precursores moleculares reaccionan en disolución bajo condiciones agresivas de temperatura y presión. A primera vista, este proceso podría parecer poco compatible con la idea de un diseño preciso de materiales ordenados. Sin embargo, es precisamente en este entorno donde emerge el control sintético estructural que da vida a estos materiales.^[33]

La formación de estas redes está gobernada por enlaces reversibles, los que, en condiciones solvotermales, adquieren un carácter dinámico en el proceso de ensamblaje. Esta reversibilidad permite al sistema reorganizarse, formar subunidades secundarias complejas (conocidas como "secondary building units" o SBUs, o "supermolecular building blocks" o SBBs), corregir defectos y evolucionar hacia estructuras ordenadas y cristalinas favorecidas termodinámicamente.^[34] Como resultado, variables sintéticas como el disolvente, la temperatura, el tiempo de reacción o la presencia de aditivos actúan como herramientas de ajuste fino. De hecho, pequeñas variaciones en estas condiciones pueden ser suficientes para favorecer distintas fases, o modular propiedades como el tamaño de cristal y el grado de defectos estructurales.^[35-40]

Es importante recalcar que hoy en día existen métodos sintéticos menos agresivos que los métodos tradicionales, y con una mayor sostenibilidad energética y ambiental. Por ejemplo, existen métodos sintéticos que operan a temperaturas

más bajas (incluso temperatura ambiente), reducen el consumo energético (microondas), emplean disolventes más verdes (incluso agua) o que directamente omiten el uso de disolvente (mecanosíntesis).^[41-43]

En conjunto, la síntesis de materiales reticulares responde a un equilibrio entre termodinámica y cinética que, lejos de limitar el diseño, lo hace posible. Aunque la predicción no es absoluta, hoy en día es viable dirigir la formación de estructuras hacia objetivos concretos. El éxito del campo no reside en haber simplificado esta complejidad, sino en haber aprendido a utilizarla como una herramienta de diseño.^[44]

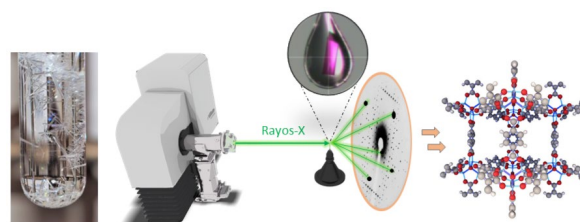


Figura 2. Representación esquemática del proceso de extracción de información estructural de los materiales reticulares a través de difracción de rayos X de monocristal.

Cristalinidad: Cuando la estructura se vuelve legible

El nivel de control estructural de los materiales reticulares adquiere una dimensión especialmente relevante gracias a una de sus características más distintivas: su naturaleza cristalina. A diferencia de muchos otros materiales porosos o amorfos, la organización periódica de estas redes permite conocer con precisión la disposición de sus componentes a escala atómica, lo que convierte la estructura no solo en algo ordenado, sino en algo directamente accesible y cuantificable.

En el campo de los materiales reticulares, particularmente en el de los MOF, la cristalinidad no es un simple detalle estructural, sino un elemento central del diseño químico. Permite identificar de forma inequívoca cada posición atómica dentro de la red a través de la difracción de monocristal y, por tanto, saber con exactitud su esqueleto, dónde se posicionan sus grupos funcionales, y qué entorno químico los rodea.^[45]

Aunque la obtención de monocristales es mucho más compleja en el campo de los COFs, la misma premisa sigue teniendo valor. A través de estudios de difracción de rayos-X en polvo o difracción de electrones, es posible estudiar y entender la naturaleza estructural de estos materiales, y consecuentemente, diseñar materiales puramente orgánicos con un objetivo claro.^[46,47]

Química molecular en la red: Modificación post-sintética de materiales reticulares

Es precisamente la posibilidad de conocer con precisión la estructura de los materiales reticulares lo que los convierte en algo más que sólidos ordenados: los transforma en plataformas químicas donde es posible intervenir de forma precisa y selectiva. Esta idea cobra su máxima expresión en la química post-sintética, donde el material ya formado deja de ser un producto final y pasa a ser un punto de partida para nuevas transformaciones químicas, sin comprometer su arquitectura global. Esto es posible debido a que los componentes de la red conservan su reactividad latente aun cuando están espaciados dentro del material.^[48-50]

Uno de los ejemplos más representativos es la metalación post-sintética, en la que sitios específicos dentro de la red se coordinan con nuevos centros metálicos una vez el material ya ha sido formado. Este proceso permite introducir funcionalidad catalítica o redox en posiciones estratégicas, aprovechando cavidades vacantes o grupos donadores accesibles.^[51] Trabajos en esta línea, como los desarrollados por los grupos de Sumbly-Doonan o Cohen, han mostrado cómo materiales ini-

cialmente estructurales pueden convertirse en plataformas catalíticas altamente selectivas, donde la actividad química está confinada a entornos diseñados con precisión atómica. En estos sistemas, además, la naturaleza cristalina del material permite determinar de forma inequívoca la posición y el entorno del metal incorporado. Esto hace posible también seguir su reactividad con una precisión excepcional, ya que las especies ancladas pueden caracterizarse a nivel atómico mediante difracción de rayos X de la red que las alberga.^[52,53]

De forma complementaria, la funcionalización orgánica post-sintética amplía este concepto hacia la manipulación directa de los ligandos que forman parte de la red. A través de reacciones químicas compatibles con la integridad del sólido, es posible introducir grupos funcionales adicionales, modular la polaridad de los poros, ajustar propiedades electrónicas o incorporar sitios de reconocimiento molecular. Reacciones como la formación de iminas, "Click Chemistry", o transformaciones directas sobre grupos amina o hidroxilo han sido ampliamente utilizadas para introducir funcionalidad adicional de manera selectiva dentro de la red.^[54] Este tipo de transformaciones ha sido clave para expandir el rango de aplicaciones de los materiales reticulares, ya que permite introducir fragmentos sensibles o fácilmente degradables a posteriori, evitando las agresivas condiciones solvotermales de síntesis.

Lo especialmente relevante de estas estrategias es que no dependen únicamente de la existencia de una estructura cristalina, sino de la combinación entre cristalinidad y accesibilidad química. Saber con precisión dónde está cada componente de la red permite que estas transformaciones no sean aleatorias, sino dirigidas: la química ocurre en posiciones concretas, dentro de un entorno estructural conocido y reproducible. En este sentido, la red no actúa como un soporte pasivo, sino como un entorno que organiza y condiciona la reactividad y, en consecuencia, su diseño para una aplicación óptima. Esta capacidad de controlar la reactividad a nivel molecular dentro de un sólido cristalino ha dado lugar también a un nuevo concepto sintético, denominado "Clip-off Chemistry" (o química de recorte), donde la ruptura selectiva de enlaces previamente programados en redes reticulares permite usar estas redes como precursores para diseñar y generar nuevas moléculas, macromoléculas o arquitecturas cristalinas.^[55-57]

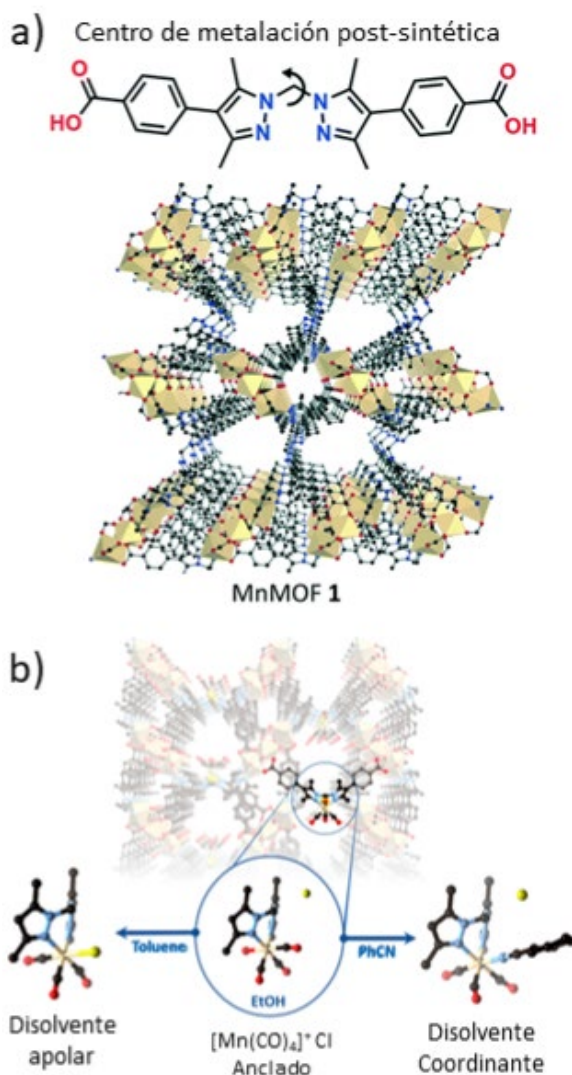


Figura 3. a) Representación visual de la estructura de un MOF con centros quelantes en los ligandos que componen su estructura, que pueden ser post-sintéticamente metalados (b) y su estructura y reactividad estudiada a través de difracción de monocristal. Figura 4b adaptada de la Ref. [53] reproducida con permiso de ACS.

Diseño dirigido: Cuando la estructura define la aplicación

La verdadera fortaleza de los materiales reticulares aparece cuando todo el control estructural y químico que hemos mencionado se traduce en función. La posibilidad de elegir componentes, modificar químicamente la red y conocer con precisión la posición de cada grupo funcional permite diseñar materiales no solo estéticamente elegantes desde el punto de vista químico, sino realmente optimizados para resolver problemas concretos.^[58]

Uno de los ejemplos más claros es en la captura y separación de gases. Materiales diseñados con poros de tamaño y polaridad específicos, o con centros metálicos abiertos, permiten discriminar entre moléculas similares, como CH₄/N₂ o propileno/propano, procesos de separación con enorme relevancia industrial y energética.^[59] En este contexto, materiales como Mg-MOF-74 (Mg₂(dobdc), donde dobdc= ácido 2,5-dihidroxitereftálico) o UiO-66 (Zr₆O₄(OH)₄(BDC)₆, donde BDC= ácido tereftálico) funcionalizados han demostrado cómo pequeñas modificaciones post-sintéticas pueden traducirse en grandes diferencias de selectividad y capacidad de adsorción del mismo material.^[60-62]

En catálisis, la posibilidad de posicionar centros activos de forma aislada y uniforme dentro de una red cristalina, bien por

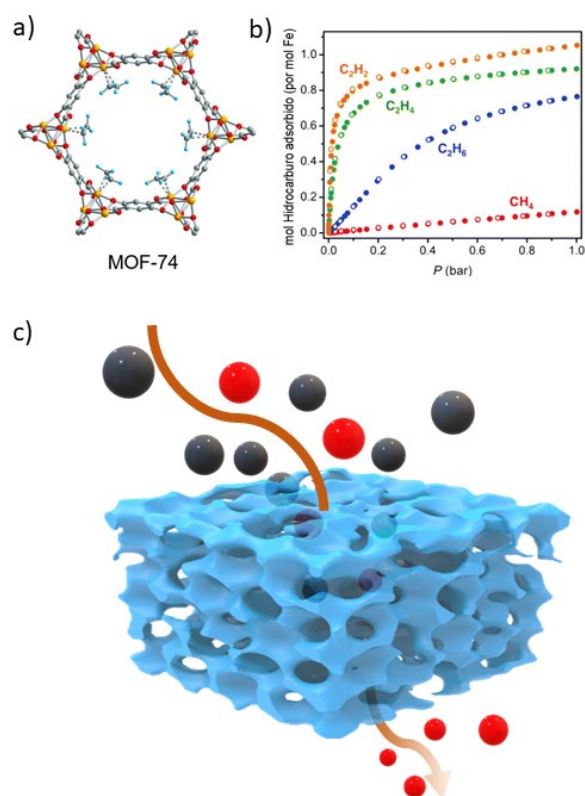


Figura 4. a) Representación de la estructura de MOF-74 y su interacción con ciertos hidrocarburos. b) Gráfica de adsorción de un derivado de MOF-74 con varios hidrocarburos. c) Esquema de permeabilidad selectiva de un derivado funcionalizado del MOF-74, capaz de discriminar y separar diferentes hidrocarburos (rojo: metano, gris: acetileno, etileno, etano) en fase gas cuando difunden a través de su estructura. Figura 4b adaptada de la Ref [61], reproducida con permiso de AAAS.

diseño o por adición posterior, ofrece una ventaja difícil de alcanzar en materiales convencionales. La metalación post-sintética permite introducir sitios catalíticos bien definidos en MOFs y COFs que combinan la precisión de la catálisis homogénea con la robustez de un sólido reutilizable.^[52,53,63]

De forma similar, en liberación controlada de fármacos o transporte molecular, la modulación precisa del tamaño de poro y de la polaridad interna y externa del material permite diseñar sistemas altamente selectivos a adsorber un fármaco, o incluso crear materiales altamente sensibles a un estímulo que permita liberarlo a voluntad.^[64-66]

Incluso en aplicaciones emergentes como la fotocatalisis, el almacenamiento de energía, o la captura de agua atmosférica, el principio sigue siendo el mismo: no se busca simplemente un material poroso, sino un entorno químico diseñado para una función concreta. En otras palabras, los materiales reticulares representan probablemente una de las aproximaciones más cercanas teóricamente a la idea de "materiales a la carta".^[67]

Conclusiones y perspectivas

En resumen, los materiales reticulares han transformado la forma de pensar la química de materiales, acercándola a un escenario donde estructura, reactividad y función pueden diseñarse de manera integrada. Esta capacidad de control, que abarca desde el diseño inicial y las condiciones de síntesis hasta la modificación post-sintética, ha abierto la puerta a una forma

distinta de entender la química de sólidos: no como entidades estáticas, sino como plataformas químicas ajustables.

En términos de aplicaciones, este cambio de paradigma se refleja en su creciente exploración en áreas como la captura y almacenamiento de gases, la separación molecular, la catálisis o la liberación controlada de especies activas. En todos estos casos, el valor añadido no reside únicamente en la porosidad del material, sino en la posibilidad de ajustar de forma precisa su entorno químico interno. Es esta combinación de estructura bien definida y funcionalidad modulable la que explica su atractivo en contextos que van desde la química ambiental hasta la energía o la química médica. Importante destacar que todas estas modificaciones no están limitadas a materiales reticulares extendidos, sino también a su homólogo finito, las cajas o poliedros orgánicos y metal-orgánicos. De igual manera, su control estructural y reactividad latente convierte a estas plataformas en materiales altamente adaptables a las condiciones necesarias, esta vez disponiendo de un control estequiométrico debido a su naturaleza molecular.^[68]

Aun así, en el campo de la química reticular persisten retos importantes, especialmente en términos de coste, estabilidad en condiciones reales y escalabilidad de los procesos sintéticos, lo que condiciona su transferencia a aplicaciones industriales de gran volumen. No todo lo que puede diseñarse con precisión atómica es, por ahora, viable fuera del laboratorio, aunque los avances en metodologías sintéticas, diseño racional y alejarse de la necesidad de condiciones de síntesis agresivas están reduciendo progresivamente estas barreras.^[69]

Quizá aún no estemos en la era de los "materiales a la carta" producidos de forma rutinaria a escala industrial, pero sí en el momento en el que esa idea ha dejado de ser ciencia ficción para convertirse en un objetivo tangible y activamente perseguido. Y como suele ocurrir en química, el verdadero reto no es solo descubrir lo que es posible, sino aprender a hacerlo de forma simple, robusta, escalable y, con suerte, ¿un poco más barata?

Agradecimientos

J.A. desea expresar su agradecimiento por la ayuda Ramón y Cajal (RYC2024-049314-I), financiada por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y por el FSE+.

Bibliografía

- [1] A. R. Oganov, C. J. Pickard, Q. Zhu, R. J. Needs, *Nat. Rev. Mater.* **2019**, *4*, 331-348, <https://doi.org/10.1038/s41578-019-0101-8>.
- [2] Z. H. Stachurski, *Materials* **2011**, *4*, Pages 1564-1598 **2011**, *4*, 1564-1598, <https://doi.org/10.3390/ma4091564>.
- [3] A. M. Smith, S. Nie, *Acc. Chem. Res.* **2009**, *43*, 190-200, <https://doi.org/10.1021/ar9001069>.
- [4] S. Chatani, C. J. Kloxin, C. N. Bowman, *Polym. Chem.* **2014**, *5*, 2187-2201, <https://doi.org/10.1039/C3PY01334K>.
- [5] A. Ferrari, F. Körmann, M. Asta, J. Neugebauer, *Nat. Comput. Sci.* **2023**, *3*, 221-229, <https://doi.org/10.1038/s43588-023-00407-4>.
- [6] M. J. Cliffe, M. T. Dove, D. A. Drabold, A. L. Goodwin, *Phys. Rev. Lett.* **2010**, *104*, 125501, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.104.125501>.
- [7] H. Furukawa, K. E. Cordova, M. O'Keeffe, O. M. Yaghi, *Science* **2013**, *341*, 1230444, <https://doi.org/10.1126/science.1230444>.
- [8] H. C. J. Zhou, S. Kitagawa, *Chem. Soc. Rev.* **2014**, *43*, 5415-5418, <https://doi.org/10.1039/C4CS90059F>.
- [9] A. P. Côté, A. I. Benin, N. W. Ockwig, M. O'Keeffe, A. J.

- Matzger, O. M. Yaghi, *Science* **2005**, *310*, 1166-1170, <https://doi.org/10.1126/science.1120411>.
- [10] R. Freund, S. Canossa, S. M. Cohen, W. Yan, H. Deng, V. Guillerm, M. Eddaoudi, D. G. Madden, D. Fairen-Jimenez, H. Lyu, L. K. Macreadie, Z. Ji, Y. Zhang, B. Wang, F. Haase, C. Wöll, O. Zaremba, J. Andreo, S. Wuttke, C. S. Diercks, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2021**, *60*, 23946-23974, <https://doi.org/10.1002/anie.202101644>.
- [11] O. M. Yaghi, M. O'Keeffe, N. W. Ockwig, H. K. Chae, M. Eddaoudi, J. Kim, *Nature* **2003**, *423*, 705-714, <https://doi.org/10.1038/nature01650>.
- [12] H. Jiang, D. Alezi, M. Eddaoudi, *Nat. Rev. Mater.* **2021**, *6*, 466-487, <https://doi.org/10.1038/s41578-021-00287-y>.
- [13] W. Xu, B. Tu, Q. Liu, Y. Shu, C. C. Liang, C. S. Diercks, O. M. Yaghi, Y. B. Zhang, H. Deng, Q. Li, *Nat. Rev. Mater.* **2020**, *5*, 764-779, <https://doi.org/10.1038/s41578-020-0225-x>.
- [14] M. O'Keeffe, O. M. Yaghi, *Chem. Rev.* **2011**, *112*, 675-702, <https://doi.org/10.1021/cr200205j>.
- [15] B. F. Hoskins, R. Robson, *J. Am. Chem. Soc.* **2002**, *111*, 5962-5964, <https://doi.org/10.1021/ja00197a079>.
- [16] B. F. Abrahams, B. F. Hoskins, D. M. Michail, R. Robson, *Nature* **1994**, *369*, 727-729, <https://doi.org/10.1038/369727a0>.
- [17] S. Kitagawa, R. Kitaura, S. I. Noro, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2004**, *43*, 2334-2375, <https://doi.org/10.1002/anie.200300610>.
- [18] H. Li, M. Eddaoudi, M. O'Keeffe, O. M. Yaghi, *Nature* **1999**, *402*, 276-279, <https://doi.org/10.1038/46248>.
- [19] M. J. Kalmuzki, N. Hanikel, O. M. Yaghi, *Sci. Adv.* **2018**, *4*, AAT9180, <https://doi.org/10.1126/sciadv.aat9180>.
- [20] M. Martos, I. M. Pastor, *ChemistryOpen* **2025**, *14*, e202400428, <https://doi.org/10.1002/open.202400428>.
- [21] Z. H. Syed, F. Sha, X. Zhang, D. M. Kaphan, M. Delferro, O. K. Farha, *ACS Catal.* **2020**, *10*, 11556-11566, <https://doi.org/10.1021/acscatal.0c03056>.
- [22] Q. Liu, N. Hoefler, G. Berkbigler, Z. Cui, T. Liu, A. C. Co, D. W. McComb, C. R. Wade, *Inorg. Chem.* **2022**, *61*, 18710-18718, <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.2c03212>.
- [23] R. M. Main, S. M. Vornholt, R. Ettliger, P. Netzsch, M. G. Stanzione, C. M. Rice, C. Elliott, S. E. Russell, M. R. Warren, S. E. Ashbrook, R. E. Morris *J. Am. Chem. Soc.* **2024**, *146*, 3270-3278, <https://doi.org/10.1021/jacs.3c11847>. [24] K. Geng, T. He, R. Liu, S. Dalapati, K. T. Tan, Z. Li, S. Tao, Y. Gong, Q. Jiang, D. Jiang, *Chem. Rev.* **2020**, *120*, 8814-8933, <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.9b00550>.
- [25] Z. Zhou, T. Ma, H. Zhang, S. Chheda, H. Li, K. Wang, S. Ehrling, R. Giovine, C. Li, A. H. Alawadhi, M. M. Abduljawad, M. O. Alawad, L. Gagliardi, J. Sauer, O. M. Yaghi, *Nature* **2024**, *635*, 96-101, <https://doi.org/10.1038/s41586-024-08080-x>.
- [26] N. Huang, X. Chen, R. Krishna, D. Jiang, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2015**, *54*, 2986-2990, <https://doi.org/10.1002/anie.201411262>.
- [27] X. Chen, L. Kong, J. A. A. Mehrez, C. Fan, W. Quan, Y. Zhang, M. Zeng, J. Yang, N. Hu, Y. Su, H. Wei, Z. Yang, *Nanomicro Lett.* **2023**, *15*, S40820-023-01107-4, <https://doi.org/10.1007/s40820-023-01107-4>.
- [28] Y. Shi, J. Yang, F. Gao, Q. Zhang, *ACS Nano* **2023**, *17*, 1879-1905, <https://doi.org/10.1021/acsnano.2c11346>.
- [29] M. Shahid, A. ur Rehman, T. Najam, H. Majeed, M. Shalash, S. M. El-Bahy, M. Sufyan Javed, S. Shoaib Ahmad Shah, M. Altaf Nazir, *ChemPhotoChem* **2024**, *8*, e202400131, <https://doi.org/10.1002/cptc.202400131>.
- [30] H. Wang, Y. Zhai, Y. Li, Y. Cao, B. Shi, R. Li, Z. Zhu, H. Jiang, Z. Guo, M. Wang, L. Chen, Y. Liu, K. G. Zhou, F. Pan, Z. Jiang, *Nat. Commun.* **2022**, *13*, 7123, <https://doi.org/10.1038/s41467-022-34849-7>.
- [31] Q. Zhang, Y. Huang, Z. Dai, Y. Li, Z. Li, R. Lai, F. Wei, F. Shao, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2025**, *17*, 27605-27628, <https://doi.org/10.1021/acscami.5c02556>.
- [32] S. T. Khan, S. M. Moosavi, *Nat. Commun.* **2025**, *16*, 5642, <https://doi.org/10.1038/s41467-025-60796-0>.
- [33] N. Stock, S. Biswas, *Chem. Rev.* **2011**, *112*, 933-969, <https://doi.org/10.1021/cr200304e>.
- [34] H. Furukawa, J. Kim, N. W. Ockwig, M. O'Keeffe, O. M. Yaghi, *J. Am. Chem. Soc.* **2008**, *130*, 11650-11661, <https://doi.org/10.1021/ja803783c>.
- [35] A. M. Evans, L. R. Parent, N. C. Flanders, R. P. Bisbey, E. Vitaku, M. S. Kirschner, R. D. Schaller, L. X. Chen, N. C. Gianneschi, W. R. Dichtel, *Science*, **2018**, *361*, 52-57, <https://doi.org/10.1126/science.aar7883>.
- [36] A. Schaate, P. Roy, A. Godt, J. Lippke, F. Waltz, M. Wiebcke, P. Behrens, *Chem. - Eur. J.* **2011**, *17*, 6643-6651, <https://doi.org/10.1002/chem.201003211>.
- [37] C. R. Marshall, S. A. Staudhammer, C. K. Brozek, *Chem. Sci.* **2019**, *10*, 9396-9408, <https://doi.org/10.1039/C9SC03802G>.
- [38] S. Tatay, S. Martínez-Giménez, A. Rubio-Gaspar, E. Gómez-Oliveira, J. Castells-Gil, Z. Dong, Á. Mayoral, N. Almora-Barrios, N. M. Padiál, C. Martí-Gastaldo, *Nat. Commun.* **2023**, *14*, 6962, <https://doi.org/10.1038/s41467-023-41936-w>.
- [39] F. C. N. Firth, M. J. Cliffe, D. Vulpe, M. Aragoes-Anglada, P. Z. Moghadam, D. Fairen-Jimenez, B. Slater, C. P. Grey, J. Mater. Chem. A Mater. **2019**, *7*, 7459-7469, <https://doi.org/10.1039/C8TA10682G>.
- [40] M. J. Cliffe, E. Castillo-Martínez, Y. Wu, J. Lee, A. C. Forse, F. C. N. Firth, P. Z. Moghadam, D. Fairen-Jimenez, M. W. Gaultois, J. A. Hill, O. V. Magdysyuk, B. Slater, A. L. Goodwin, C. P. Grey, *J. Am. Chem. Soc.* **2017**, *139*, 5397-5404, <https://doi.org/10.1021/jacs.7b00106>.
- [41] J. Martín-Illán, D. Rodríguez-San-Miguel, D. Rodríguez-San-Miguel, C. Franco, I. Imaz, D. Maspoch, D. Maspoch, J. Puigmartí-Luis, F. Zamora, *Chem. Commun.* **2020**, *56*, 6704-6707, <https://doi.org/10.1039/DOCC02033H>.
- [42] M. Klimakow, P. Klobes, A. F. Thünemann, K. Rademann, F. Emmerling, *Chem. Mater.* **2010**, *22*, 5216-5221, <https://doi.org/10.1021/cm1012119>.
- [43] H. Vardhan, B. Shin, X. Wang, S. Y. Jiang, A. Alazmi, R. Zhang, Y. Han, X. Wu, R. Verduzco, *Chem. Mater.* **2025**, *37*, 2258-2267, <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.4c03398>.
- [44] M. G. Goesten, F. Kapteijn, J. Gascon, *CrystEngComm* **2013**, *15*, 9249-9257, <https://doi.org/10.1039/C3CE41241E>.
- [45] J. Albalad, C. J. Sumby, D. Maspoch, C. J. Doonan, *CrystEngComm* **2021**, *23*, 2185-2195, <https://doi.org/10.1039/D1CE00067E>.
- [46] E. Lin, Z. Wang, Z. Zhang, *J. Mater. Chem. A* **2024**, *12*, 21704-21715, <https://doi.org/10.1039/D4TA02312A>.
- [47] G. Zhou, T. Yang, Z. Huang, *Commun. Chem.* **2023**, *6*, 116, <https://doi.org/10.1038/s42004-023-00915-4>.
- [48] S. M. Cohen, N. L. Rosi, *Inorg. Chem.* **2021**, *60*, 11703-11705, <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.1c02159>.
- [49] W. He, D. Lv, Y. Guan, S. Yu, *J. Mater. Chem. A* **2023**, *11*, 24519-24550, <https://doi.org/10.1039/D3TA05158G>.
- [50] J. L. Segura, S. Royuela, M. Mar Ramos, *Chem. Soc. Rev.* **2019**, *48*, 3903-3945, <https://doi.org/10.1039/C8CS00978C>.
- [51] J. D. Evans, C. J. Sumby, C. J. Doonan, *Chem. Soc. Rev.* **2014**, *43*, 5933-5951, <https://doi.org/10.1039/C4CS00076E>.
- [52] R. A. Peralta, M. T. Huxley, J. Albalad, C. J. Sumby, C. J. Doonan, *Inorg. Chem.* **2021**, *60*, 11775-11783, <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.1c00849>.
- [53] M. T. Huxley, R. J. Young, W. M. Bloch, N. R. Champness, C. J. Sumby, C. J. Doonan, *Organometallics* **2019**, *38*, 3412-3418,

- <https://doi.org/10.1021/acs.organomet.9b00401>.
- [54] A. M. Fracaroli, P. Siman, D. A. Nagib, M. Suzuki, H. Furukawa, F. D. Toste, O. M. Yaghi, *J. Am. Chem. Soc.* **2016**, *138*, 8352-8355, <https://doi.org/10.1021/jacs.6b04204>.
- [55] Y. Yang, A. Broto-Ribas, B. Orfín-Rubio, I. Imaz, F. Gándara, A. Carné-Sánchez, V. Guillerm, S. Jurado, F. Busqué, J. Juanhuix, D. Maspoch, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2022**, *61*, e202111228, <https://doi.org/10.1002/anie.202111228>.
- [56] R. Sánchez-Naya, J. P. Cavalieri, J. Albalad, A. Cortés-Martínez, K. Wang, C. Fuertes-Espinosa, T. Parella, S. Fiori, E. Ribas, A. Mugarza, X. Ribas, J. Farauto, O. M. Yaghi, I. Imaz, D. Maspoch, *Science* **2025**, *388*, 1318-1323, <https://doi.org/10.1126/science.adw4126>.
- [57] S. Ruiz-Relaño, D. Nam, J. Albalad, A. Cortés-Martínez, J. Juanhuix, I. Imaz, D. Maspoch, *J. Am. Chem. Soc.* **2024**, *146*, 26603-26608, <https://doi.org/10.1021/jacs.4c09431>.
- [58] J. Albalad, R. A. Peralta, M. T. Huxley, S. Tsoukatos, Z. Shi, Y. B. Zhang, J. D. Evans, C. J. Sumbly, C. J. Doonan, *Chem. Sci.* **2021**, *12*, 14893-14900, <https://doi.org/10.1039/D1SC04712D>.
- [59] X. Li, S. Mukherjee, M. J. Zaworotko, *Adv. Mater.* **2026**, *38*, e12551, <https://doi.org/10.1002/adma.202512551>.
- [60] E. J. Kim, R. L. Siegelman, H. Z. H. Jiang, A. C. Forse, J. H. Lee, J. D. Martell, P. J. Milner, J. M. Falkowski, J. B. Neaton, J. A. Reimer, S. C. Weston, J. R. Long, *Science* **2020**, *369*, 392-396, <https://doi.org/10.1126/science.abb3976>.
- [61] E. D. Bloch, W. L. Queen, R. Krishna, J. M. Zadrozny, C. M. Brown, J. R. Long, *Science* **2012**, *335*, 1606-1610, <https://doi.org/10.1126/science.1217544>.
- [62] H. Lyu, H. Li, N. Hanikel, K. Wang, O. M. Yaghi, *J. Am. Chem. Soc.* **2022**, *144*, 12989-12995, <https://doi.org/10.1021/jacs.2c05382>.
- [63] Y. Chen, D. Jiang, *Acc. Chem. Res.* **2024**, *57*, 3182-3193, <https://doi.org/10.1021/acs.accounts.4c00517>.
- [64] F. Xing, J. Xu, Y. Zhou, P. Yu, M. Zhe, Z. Xiang, X. Duan, U. Ritz, *Nanoscale* **2024**, *16*, 4434-4483, <https://doi.org/10.1039/D3NR05776C>.
- [65] R. Ghosh, M. S. Hasan, S. Gothwal, J. Lee, P. Dhasaiyan, J.-H. Ryu, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2026**, *18*, 25682-25702, <https://doi.org/10.1021/acsami.6c01807>.
- [66] P. Ghosh, P. Banerjee, *Chem. Commun.* **2023**, *59*, 12527-12547, <https://doi.org/10.1039/D3CC01829F>.
- [67] W. Xu, O. M. Yaghi, *ACS Cent. Sci.* **2020**, *6*, 1348-1354, <https://doi.org/10.1021/acscentsci.0c00678>.
- [68] J. Albalad, L. Hernández-López, A. Carné-Sánchez, D. Maspoch, *Chem. Commun.* **2022**, *58*, 2443-2454, <https://doi.org/10.1039/D1CC07034G>.
- [69] A. M. Wright, M. T. Kapelewski, S. Marx, O. K. Farha, W. Morris, *Nat. Mater.* **2025**, *24*, 178-187, <https://doi.org/10.1038/s41563-024-01947-4>.



Chemistry Europe

We support the next generation of chemists

Apply for the Chemistry Europe Travel Grant

