

# Estructuras imidazolato zeolíticas (ZIFs): de materiales cristalinos porosos a vidrios híbridos funcionales

## Zeolitic imidazolate frameworks (ZIFs): from porous crystalline materials to functional hybrid glasses

Luis León Alcaide<sup>1</sup> y Guillermo Mínguez Espallargas<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ciencia de Materiales y Metalurgia, Universidad de Cambridge.

<sup>2</sup> Instituto de Ciencia Molecular (ICMol), Universidad de Valencia.

### PALABRAS CLAVE:

ZIFs  
MOFs  
Vidrios híbridos  
Materiales porosos  
Amorfización

### RESUMEN:

Las estructuras imidazolato zeolíticas, cuyas siglas son ZIFs (por su nombre en inglés, *zeolitic imidazolate frameworks*), constituyen una de las familias más versátiles dentro de los materiales metal-orgánicos. Su éxito se debe a la combinación de una elevada estabilidad química y térmica, una gran diversidad estructural y la posibilidad de modular sus propiedades mediante la selección del metal, del ligando y del método de síntesis. En los últimos años, el interés por los ZIFs ha crecido todavía más debido al descubrimiento de sus fases amorfas, líquidas y vítreas, que abren una nueva dimensión en la química de materiales híbridos. En este trabajo se revisan los fundamentos estructurales de los ZIFs, su polimorfismo, sus principales rutas de síntesis y su capacidad para amorfizar, fundirse y formar vidrios. También se discuten sus técnicas de caracterización y sus aplicaciones emergentes en separación de gases, almacenamiento de energía, óptica y materiales funcionales.

### KEYWORDS:

ZIFs  
MOFs  
Hybrid glasses  
Porous materials  
Amorphization

### ABSTRACT:

Zeolitic imidazolate frameworks (ZIFs) are one of the most versatile families within metal-organic materials. Their success arises from the combination of high chemical and thermal stability, broad structural diversity, and the possibility of tuning their properties through the choice of metal, linker, and synthetic route. In recent years, interest in ZIFs has increased even further due to the discovery of their amorphous, liquid, and glassy phases, which open a new dimension in the chemistry of hybrid materials. This article reviews the structural foundations of ZIFs, their polymorphism, their main synthetic approaches, and their ability to amorphize, melt, and form glasses. Their characterization and emerging applications in gas separation, energy storage, optics, and functional materials are also discussed.

## Introducción

La química de materiales porosos ha experimentado una transformación profunda en las últimas décadas. Durante mucho tiempo, el protagonismo en este campo estuvo dominado por materiales inorgánicos como las zeolitas, las sílices mesoporosas y los carbones activados. Sin embargo, el desarrollo de los materiales metal-orgánicos, conocidos como MOFs por sus siglas en inglés (*metal organic frameworks*), abrió nuevas posibilidades al permitir construir redes cristalinas a partir de la combinación racional de nodos metálicos y ligandos orgánicos.<sup>[1-3]</sup> Esta estrategia modular permitió acceder a una enorme diversidad de arquitecturas, porosidades y funcionalidades químicas, hasta el punto de llevar a la concesión del Premio Nobel de Química de 2025 a Susumu Kitagawa, Richard Robson y Omar Yaghi por sus contribuciones pioneras al desarrollo de este campo.

Dentro de esta gran familia, las estructuras imidazolato zeolíticas, o ZIFs,<sup>[4]</sup> ocupan una posición especialmente destacada. Desde su aparición, estos materiales, con topologías similares a las de las zeolitas inorgánicas, han atraído un enorme interés no solo por su porosidad, sino por reunir una serie de características poco comunes en el ámbito de los MOFs: elevada

estabilidad química, buena resistencia térmica, gran variedad topológica y una notable flexibilidad sintética.<sup>[5]</sup> Todo ello ha convertido a los ZIFs en una plataforma de referencia para estudiar desde fenómenos de adsorción y separación de gases hasta aplicaciones en catálisis, biomedicina, membranas, películas delgadas y materiales compuestos.<sup>[6]</sup>

No obstante, una de las aportaciones más sorprendentes de esta familia ha surgido en años recientes, cuando se observó que algunos ZIFs son capaces de ir más allá del estado cristalino convencional. En determinados casos, estos materiales pueden amorfizar, fundirse y, tras un enfriamiento controlado, generar vidrios híbridos, en un proceso conceptualmente análogo al observado en la sílice y otros vidrios inorgánicos clásicos.<sup>[7]</sup> Este descubrimiento ha modificado de forma significativa la manera en la que entendemos los MOFs, tradicionalmente asociados a estructuras cristalinas rígidas y ordenadas. La posibilidad de obtener líquidos y vidrios a partir de redes metal-orgánicas ha abierto una nueva línea de investigación en la intersección entre química reticular, física del estado vítreo y ciencia de materiales funcionales.<sup>[8]</sup>

En este contexto, los ZIFs representan un caso especialmente interesante. Por un lado, conservan la química de coordi-

**CÓMO CITAR:** L. León Alcaide, G. Mínguez Espallargas. *An. Quím. RSEQ* 2026, 122, 126-133, <https://doi.org/10.62534/rseq.aq.2134>

\* C-e: [guillermo.minguez@uv.es](mailto:guillermo.minguez@uv.es)

nación que caracteriza a los MOFs; por otro, muestran paralelismos estructurales con las zeolitas inorgánicas y, además, presentan analogías conceptuales con los vidrios de sílice. Esta combinación los convierte en un sistema ideal para explorar cómo la estructura, el desorden y la dinámica afectan a las propiedades de los materiales.<sup>[9]</sup>

El objetivo de este artículo es ofrecer una visión general y divulgativa sobre los ZIFs, desde sus fundamentos estructurales y sintéticos hasta su evolución hacia fases amorfas y vítreas. Se discutirán su relación con las zeolitas, la importancia del polimorfismo, la variedad de métodos de síntesis y, de forma especial, su comportamiento térmico y la formación de vidrios. Finalmente, se presentarán las técnicas más utilizadas para su caracterización y algunas de las aplicaciones más prometedoras de estos materiales híbridos.

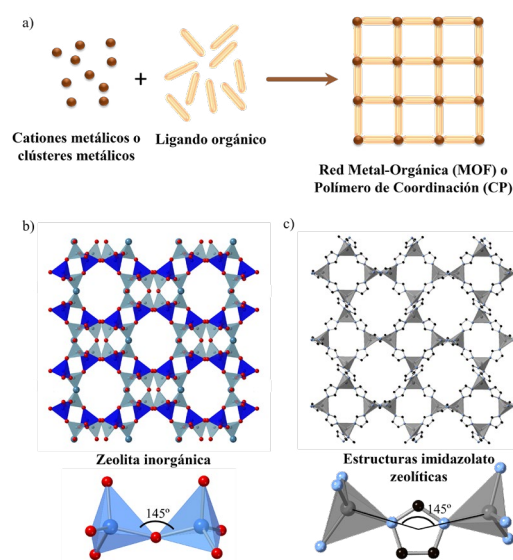
### ZIFs: una familia singular dentro de los MOFs

Los ZIFs son redes tridimensionales construidas a partir de cationes metálicos, normalmente divalentes, enlazados por ligandos imidazolato o por derivados de este.<sup>[10]</sup> La característica que los distingue de otros MOFs es que el ángulo formado entre dos centros metálicos unidos por un imidazolato es muy similar al ángulo Si–O–Si presente en las zeolitas (Figura 1).<sup>[11]</sup> Esta coincidencia geométrica favorece la aparición de topologías análogas a las de las zeolitas inorgánicas y explica el origen de su nombre.

Este parentesco estructural no implica que ZIFs y zeolitas sean materiales equivalentes. Las zeolitas son redes puramente inorgánicas muy robustas, formadas por tetraedros de silicio y aluminio enlazados por oxígeno. Los ZIFs, en cambio, son materiales híbridos en los que la parte orgánica desempeña un papel decisivo. Esa naturaleza híbrida les confiere una mayor capacidad de ajuste químico, ya que es posible modificar tanto el metal como el ligando, introducir grupos funcionales o incluso mezclar distintos componentes dentro de una misma red.<sup>[12]</sup> En otras palabras, los ZIFs combinan la regularidad topológica propia de una zeolita con la flexibilidad composicional típica de la química de coordinación y, en concreto, del campo de los MOFs.

El ejemplo más conocido dentro de la familia de los ZIFs es ZIF-8,<sup>[5,13]</sup> una estructura formada por  $Zn^{2+}$  y 2-metilimidazolato, con topología tipo sodalita (Figura 2). ZIF-8 se ha convertido en uno de los materiales de referencia de toda la química de MOFs debido a su síntesis relativamente sencilla, al bajo coste de sus precursores, a su gran área superficial y a su notable estabilidad. Su estructura presenta cavidades nanométricas conectadas por ventanas estrechas, lo que le confiere un comportamiento muy interesante en procesos de separación molecular.<sup>[14]</sup> Además, la facilidad con la que puede prepararse en diferentes tamaños de partícula, recubrimientos o membranas ha favorecido enormemente su expansión en múltiples campos.<sup>[15]</sup>

La química de los ZIFs, sin embargo, va mucho más allá de ZIF-8. El uso de otros metales como Co,<sup>[10]</sup> Fe,<sup>[16]</sup> Mn,<sup>[17]</sup> Cd<sup>[18]</sup> o Mg,<sup>[19]</sup> así como la incorporación de diferentes derivados del imidazol, permite acceder a toda una familia de redes con propiedades muy diversas. En muchos casos, pequeños cambios en la composición dan lugar a modificaciones importantes en la adsorción, en la respuesta mecánica, en la flexibilidad del esqueleto o en la estabilidad frente al aire y la humedad.<sup>[20]</sup> De este modo, los ZIFs ilustran muy bien una idea central en ciencia de materiales: una ligera modificación local en la química de enlace puede producir un cambio macroscópico notable en las propiedades.



**Figura 1.** a. Representación esquemática de la formación de un MOF a partir de cationes metálicos, o clústeres metálicos, y ligandos orgánicos. b. Analogía estructural entre las zeolitas inorgánicas y las estructuras imidazolato zeolíticas (ZIFs).

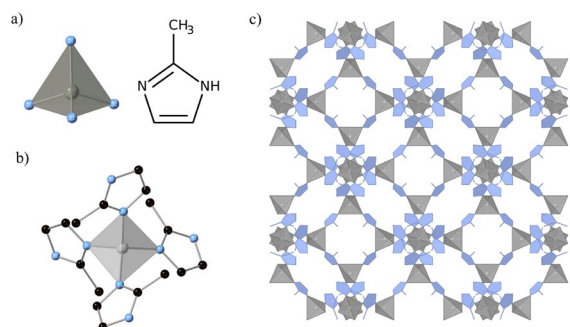
### Polimorfismo y diversidad estructural

Una de las razones por las que los ZIFs son tan interesantes es su marcado carácter polimórfico.<sup>[21]</sup> El polimorfismo implica que una misma combinación de metal y ligando puede organizarse de varias maneras distintas, dando lugar a topologías diferentes. En el caso de los ZIFs, esta posibilidad es especialmente amplia debido a la flexibilidad angular de los enlaces metal–imidazolato y a la naturaleza relativamente rotacional del ligando.

Este fenómeno tiene consecuencias importantes. En primer lugar, significa que la química de ZIFs no puede entenderse únicamente en términos de composición, sino también de estructura.<sup>[22]</sup> Dos materiales con la misma fórmula pueden presentar distinta porosidad, diferente densidad, distinta estabilidad térmica y comportamientos muy diferentes frente a la adsorción o los cambios de temperatura. En segundo lugar, el polimorfismo desempeña un papel crucial en la aparición del estado líquido y del estado vítreo en estos materiales, ya que la relación entre fases metaestables y fases más densas influye directamente en la capacidad del material para amorfizar o fundirse.<sup>[23]</sup>

La topología accesible depende en gran medida de la naturaleza del ligando. Los ligandos pequeños, como el imidazolato, tienden a permitir una mayor variedad de redes, mientras que el aumento de volumen reduce el número de topologías posibles. En términos sencillos, cuanto más voluminoso o más rígido es el ligando, más condicionada queda la forma en la que los nodos metálicos pueden organizarse en el espacio. De este modo, la funcionalización del anillo imidazólico no solo modifica la química del material, sino también su estructura.<sup>[24]</sup>

A todo esto se suma la posibilidad de emplear mezclas de ligandos. Los llamados ZIFs heterolépticos permiten incorporar en una misma red dos o más imidazolatos distintos, generando estructuras imposibles de alcanzar con un solo ligando puro.<sup>[25]</sup> Esta estrategia amplía todavía más la diversidad estructural y abre la puerta a un nivel más de diseño de propiedades.<sup>[26]</sup> Además, pone de manifiesto que los ZIFs no deben entenderse como estructuras fijas y aisladas, sino como una familia dinámica de materiales en la que composición, topología y función están estrechamente interconectadas.



**Figura 2.** a) Componentes estructurales de ZIF-8: centro tetraédrico de  $Zn^{2+}$  y metilimidazol. b) Estructura básica de ZIF-8, con un centro de  $Zn^{2+}$  coordinado a cuatro imidazolatos. c) Estructura cristalina de ZIF-8, con topología sodalita.

### Versatilidad sintética: de métodos convencionales en disolución a rutas sin disolvente

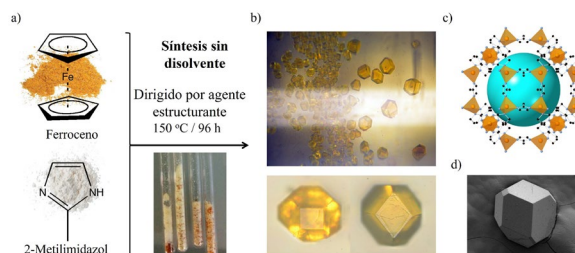
Otro de los grandes atractivos de los ZIFs es la enorme variedad de métodos disponibles para su síntesis. En sus primeros años, la mayoría de estos materiales se preparaban mediante procedimientos solvotermales en disolventes orgánicos, como metanol, dimetilformamida o N-metilpirrolidona.<sup>[27]</sup> Estas rutas fueron esenciales para demostrar la viabilidad del campo y permitieron obtener muchas de las estructuras fundacionales de la familia.<sup>[28]</sup> Sin embargo, con el tiempo se hizo evidente que la química de los ZIFs ofrecía posibilidades mucho más amplias.

Una de las grandes ventajas de los imidazoles como ligandos es su elevada reactividad frente a distintos precursores metálicos. Esto ha permitido desarrollar rutas de síntesis más sencillas, rápidas y sostenibles, incluyendo métodos acuosos a temperatura ambiente.<sup>[29]</sup> En el caso de ZIF-8, por ejemplo, la síntesis en agua ha tenido un impacto muy importante, especialmente en aplicaciones biomédicas, donde se valora la compatibilidad con medios suaves y la ausencia de disolventes agresivos.<sup>[30]</sup> Aunque inicialmente estas rutas requerían grandes excesos de ligando, la optimización progresiva del proceso ha permitido mejorar el rendimiento y acercarse a condiciones más estequiométricas.

Además de los métodos en solución, se han explorado otras formas de aportar energía al sistema, como la sonicación o la irradiación por microondas, que reducen drásticamente los tiempos de síntesis.<sup>[31]</sup> También se han desarrollado rutas ionotermales.<sup>[32]</sup> Sin embargo, probablemente uno de los desarrollos más interesantes en este campo ha sido el avance de las metodologías con minimización o ausencia de disolvente.

La mecanoquímica es uno de los ejemplos más representativos.<sup>[33]</sup> En ella, la energía mecánica inducida por molienda favorece la reacción entre sólidos, permitiendo obtener ZIFs de manera rápida, limpia y con escaso consumo de disolvente. Más allá de su interés práctico, la mecanoquímica ha mostrado que los ZIFs pueden formarse a través de caminos muy distintos de los tradicionales, y que incluso es posible controlar la topología mediante la elección de pequeñas cantidades de líquido o aditivos.

Junto a estas rutas, existen procedimientos estáticos inspirados en procesos naturales de envejecimiento mineral, así como métodos de conversión por vapor.<sup>[34]</sup> Pero quizás la metodología más singular, y particularmente relevante para el desarrollo de materiales vítreos, es la síntesis en medio fundido.<sup>[35]</sup> En este caso, el propio ligando imidazólico, al fundir, actúa como medio de reacción. Esta estrategia permite acceder a materiales que a menudo no se obtienen por vías convencionales, como



**Figura 3.** Esquema de reacción de la formación de MUV-3, el análogo de hierro (II) del ZIF-8. a) Condiciones de síntesis. b) Imágenes de los cristales formados. c) Estructura cristalina. d) Imagen de SEM de un cristal de MUV-3.

ciertos ZIFs de hierro (II) (Figura 3),<sup>[16,36]</sup> y conecta directamente con la química del estado fundido y con el estudio posterior de líquidos y vidrios derivados de ZIFs.

También merece atención la deposición química en fase vapor, que aprovecha la reactividad de ligandos imidazólicos volátiles para transformar precursores sólidos en capas delgadas de ZIF.<sup>[37]</sup> Este tipo de técnicas ha resultado especialmente prometedor para la integración de ZIFs en dispositivos, películas funcionales y arquitecturas bidimensionales.

En conjunto, la diversidad sintética de los ZIFs ilustra muy bien hasta qué punto esta familia de materiales se adapta a distintos objetivos: desde la obtención de polvos porosos hasta películas, membranas, nanocristales o materiales amorfos. Esta amplitud metodológica es, sin duda, uno de los factores clave de su éxito.

### De la cristalinidad al desorden: ZIFs amorfos

Aunque los ZIFs se desarrollaron inicialmente como materiales cristalinos, pronto se observó que también podían existir en estados desordenados.<sup>[38]</sup> Esto supuso un cambio conceptual importante. En lugar de considerar la pérdida de cristalinidad como un simple deterioro estructural, empezó a verse como una vía alternativa para generar nuevos materiales con propiedades distintas.

La amorfización puede producirse de varias formas. Una de las más conocidas es la inducida por molienda, donde la acción mecánica rompe progresivamente el orden a largo alcance sin necesariamente destruir las unidades locales de coordinación.<sup>[39]</sup> También puede producirse por calentamiento o por presión, cuando ciertas estructuras experimentan colapso antes de recrystalizar o fundirse.<sup>[40]</sup> Estos procesos han mostrado que el paso del estado cristalino al amorfo no siempre es abrupto ni irreversible, y que pueden existir fases intermedias con distintos grados de orden local.<sup>[41]</sup>

Desde el punto de vista estructural, los ZIFs amorfos resultan particularmente interesantes, ya que conservan parte de la conectividad química del material original. Es decir, aunque se pierde el orden a largo alcance, y con ello los característicos picos de difracción asociados a los planos cristalográficos que satisfacen la ley de Bragg, permanecen definidos los entornos locales en torno al metal y a los ligandos. En este contexto, el desorden no implica una ausencia total de estructura, sino la pérdida de periodicidad a larga distancia.

Este comportamiento conecta a los ZIFs con otras familias de materiales amorfos, como los vidrios inorgánicos o los polímeros desordenados, pero con una diferencia importante: en los ZIFs, el enlace de coordinación y la naturaleza híbrida del

esqueleto introducen mecanismos de transformación y relajación distintos. Por ello, el estudio de las fases amorfas de ZIFs no solo tiene interés aplicado, sino también fundamental, ya que ayuda a comprender cómo se reorganizan las redes metal-orgánicas bajo estímulos térmicos o mecánicos.

### ZIFs líquidos y vítreos: una nueva frontera

La posibilidad de fundir un MOF parecía, hasta hace relativamente poco, una idea casi contradictoria. La mayoría de estos materiales se descomponen al calentarse antes de alcanzar una fase líquida. Sin embargo, en el caso de algunos ZIFs se ha demostrado que la red puede reconfigurarse dinámicamente sin desintegrarse por completo, permitiendo la aparición de un líquido de naturaleza metal-orgánica.<sup>[42]</sup>

Este hallazgo fue revolucionario porque amplió el concepto mismo de MOF. Ya no se trataba únicamente de un sólido cristalino poroso, sino de una red híbrida que, bajo ciertas condiciones, podía entrar en un estado líquido y, tras enfriamiento, vitrificar (Figura 4). Así surgieron los llamados vidrios de ZIF, una nueva clase de materiales que combinan elementos de la química reticular con las propiedades del estado vítreo.<sup>[43]</sup>

El caso paradigmático es ZIF-4.<sup>[23]</sup> Al calentarse, este material pasa por distintas transformaciones: primero puede amorfizarse, después recristalizar en una fase más densa y, finalmente, fundir a alta temperatura. Si ese líquido se enfría con la suficiente rapidez antes de descomponerse, se obtiene un vidrio. En esta fase vítreo se conserva la coordinación tetraédrica del metal, pero desaparece la periodicidad cristalina. El resultado es una red desordenada continua, análoga en cierto sentido a la de los vidrios de silicato, aunque construida a partir de enlaces metal-imidazolato.

Uno de los aspectos más interesantes es que la capacidad de fundir no es universal en todos los ZIFs. Parece depender de un equilibrio delicado entre estabilidad térmica, topología, densidad estructural y naturaleza de los ligandos.<sup>[44]</sup> En general, las redes más densas y con ligandos con libertad de rotación tienen mayor probabilidad de alcanzar el estado líquido antes de descomponerse. Por el contrario, las estructuras muy porosas, como ZIF-8, suelen descomponerse antes de fundir.<sup>[45]</sup>

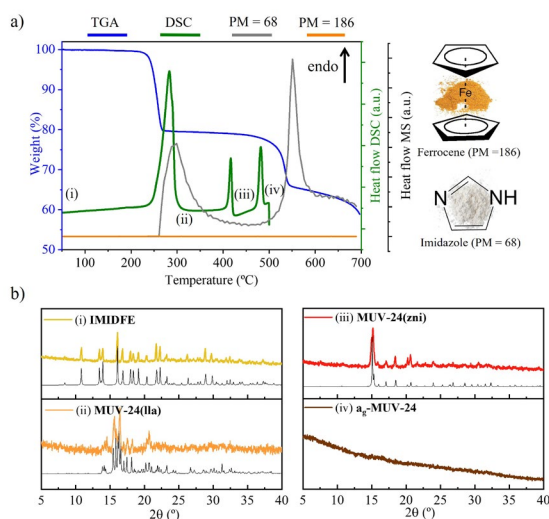
Para superar esta limitación, se han desarrollado diferentes estrategias. Una de ellas consiste en introducir un segundo ligando más voluminoso, como el benzimidazolato, para generar estructuras del tipo ZIF-62,<sup>[46]</sup> cuya fusión ocurre a temperaturas significativamente menores. Otra estrategia emplea intercambio de ligandos o infiltración de especies externas para modificar la estabilidad del material y facilitar la aparición del estado líquido. En todos los casos, el objetivo es el mismo: redu-

cir la barrera energética hacia la fusión y estabilizar el líquido resultante.

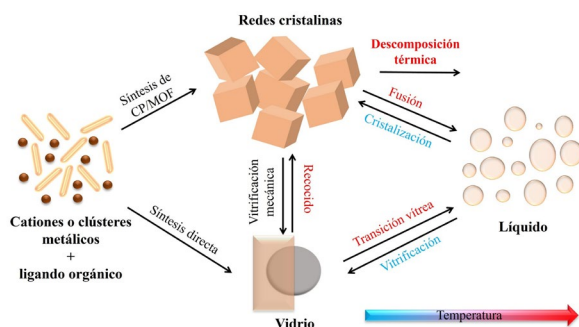
La existencia de ZIFs vítreos es importante no solo por curiosidad científica, sino porque el estado vítreo aporta propiedades nuevas. Un vidrio carece de bordes de grano, puede moldearse con mayor facilidad y presenta una isotropía que a menudo no está presente en el cristal policristalino. Esto abre nuevas oportunidades para procesado, conformado y fabricación de materiales funcionales.<sup>[47]</sup>

### Caracterización de ZIFs vítreos

La caracterización de los ZIFs vítreos y amorfos requiere combinar distintas técnicas, ya que ninguna por sí sola permite describir completamente estos sistemas (Figura 5). Una de las primeras herramientas es el análisis térmico. La termogravimetría permite identificar la descomposición y la posible pérdida de disolvente o especies adsorbidas, mientras que la calorimetría diferencial de barrido resulta esencial para detectar transiciones como amorfización, recristalización, fusión o transición vítreo. En estos materiales, la identificación de la temperatura de transición vítreo es especialmente importante, ya que confirma la naturaleza vítreo del sólido enfriado.<sup>[48]</sup>



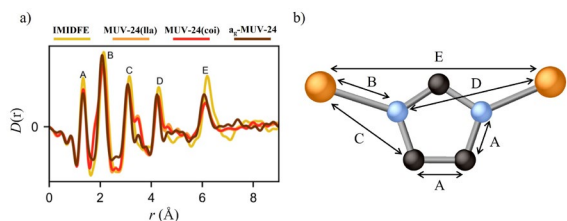
**Figura 5.** a. Análisis térmico de un ZIF de Fe,  $[\text{Fe}_3(\text{im})_6(\text{Him})_2]$  (IMIDFE), mostrando la termogravimetría (en azul) y la calorimetría diferencial de barrido (en verde). b. Difractogramas de rayos X de muestras policristalinas de las diferentes fases que se obtienen al calentar  $[\text{Fe}_3(\text{im})_6(\text{Him})_2]$  a las temperaturas indicadas en la Figura 5a.



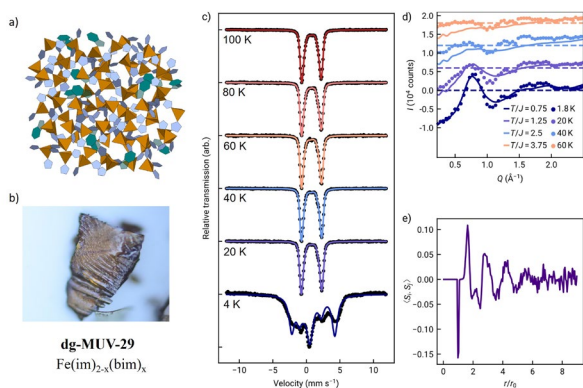
**Figura 4.** Representación esquemática de las posibles transformaciones que tienen lugar con la temperatura, desde la formación de un MOF cristalino a partir de los precursores, a la obtención de un líquido.

La difracción de rayos X en polvo sigue siendo una técnica básica para diferenciar entre fases cristalinas y amorfas. Cuando el material pierde su orden a larga distancia, desaparecen los picos de Bragg y el patrón se vuelve difuso. Sin embargo, esto no basta para conocer la estructura local. Para ello se emplean técnicas de dispersión total de rayos X o de neutrones, a partir de las cuales se obtiene la función de distribución de pares (Figura 6).<sup>[49]</sup> Esta función permite acceder a distancias interatómicas incluso en ausencia de cristalinidad y ha sido clave para demostrar que, en muchos vidrios de ZIF, persisten las unidades locales de coordinación del cristal de partida.<sup>[50]</sup> Las técnicas espectroscópicas también aportan información fundamental. La espectroscopía vibracional permite seguir cambios en el enlace metal-ligando, en la integridad del ligando

orgánico y en los mecanismos de amortización. La resonancia magnética nuclear de estado sólido ha proporcionado datos muy valiosos sobre el entorno local de los centros metálicos y sobre el grado de distorsión estructural tras la vitrificación,<sup>[51]</sup> al igual que la espectroscopía Mössbauer en el caso de sistemas de hierro<sup>[52]</sup> (Figura 7). Del mismo modo, diferentes microscopías electrónicas y técnicas asociadas de análisis elemental permiten estudiar homogeneidad, interfaces y distribución de componentes, especialmente en vidrios mezclados o en composites.<sup>[53,54]</sup>



**Figura 6.** a. Función de distribución de pares de rayos X en forma de  $D(r)$  de IMIDFE, MUV-24(IIa), MUV-24(coi) y ag-MUV-24 (ver Figura 5). b. Representación estructural del orden de corto alcance que hace coincidir los enlaces y las distancias de pares con los picos mostrados en a. Los átomos de Fe, C y N se muestran en marrón, negro y azul, respectivamente.



**Figura 7.** a. Representación esquemática de la estructura amorfa de dg-MUV-29. b. Imagen óptica de dg-MUV-29. c. Espectros Mössbauer a diferentes temperaturas de dg-MUV-29. Las líneas sobre los puntos experimentales representan las distribuciones estimadas de desdoblamiento cuadrupolares. d. Difracción de neutrones de MUV-29: los puntos representan los datos experimentales de dg-MUV-29, y la línea representa la simulación de Monte Carlo (MC). e. Función de correlación de espín en el espacio real derivada de simulaciones MC.

Finalmente, la modelización computacional desempeña un papel cada vez más importante. Simulaciones de dinámica molecular, cálculos basados en teoría del funcional de la densidad y modelos de Monte Carlo han permitido visualizar mecanismos de fusión, intercambio de ligandos, deformación local y conectividad topológica en los líquidos y vidrios de ZIF.<sup>[44]</sup> Estas aproximaciones son especialmente útiles porque ayudan a interpretar estructuras que, por definición, no pueden describirse mediante una celda unidad periódica convencional.

### Propiedades y aplicaciones emergentes de los ZIFs vítreos

El interés por los ZIFs vítreos no se limita a su singularidad estructural. Una parte esencial de la investigación actual se

centra en sus propiedades y en las aplicaciones que podrían derivarse de ellas. En muchos casos, el paso del estado cristalino al vítreo genera una combinación poco habitual de procesabilidad, desorden controlado y funcionalidad química.

Una de las cuestiones más relevantes es la porosidad. Tradicionalmente se asumía que la pérdida de cristalinidad implicaría una pérdida casi completa de porosidad accesible. Sin embargo, diversos estudios han demostrado que algunos vidrios de ZIF mantienen microporosidad e incluso capacidad de adsorción de gases.<sup>[55]</sup> Aunque su volumen de poro suele ser menor que el del cristal precursor, esta porosidad residual puede ser suficiente para aplicaciones de separación o captura molecular.<sup>[56]</sup> Además, en ciertos casos se ha mostrado que la estructura del vidrio puede ajustarse para optimizar canales de difusión o generar espumas vítreas con mayor accesibilidad.<sup>[57]</sup>

Esta característica es especialmente prometedora en membranas. Los materiales policristalinos presentan a menudo defectos asociados a los límites de grano, que perjudican la selectividad. En cambio, un vidrio de ZIF puede conformarse como un monolito continuo, sin fronteras de grano, lo que reduce trayectorias de difusión no deseadas. Esta propiedad ha impulsado el estudio de membranas vítreas para separación de gases, donde el equilibrio entre difusión, selectividad y estabilidad resulta crítico.<sup>[58]</sup>

Desde el punto de vista mecánico, los vidrios de ZIF ocupan una posición intermedia entre los vidrios inorgánicos clásicos y los materiales poliméricos. Presentan dureza y módulo elástico relativamente moderados, pero a la vez una capacidad de procesado y una respuesta al esfuerzo muy atractivas.<sup>[59]</sup> La ausencia de bordes de grano, junto con la posibilidad de moldeado térmico, los convierte en candidatos interesantes para recubrimientos, conformado de piezas y materiales híbridos estructurales.

También sus propiedades térmicas son reseñables. En general, estos materiales muestran conductividades térmicas bajas, lo que sugiere aplicaciones potenciales como materiales aislantes ligeros.<sup>[60]</sup> De forma similar, la combinación de desorden estructural y química de coordinación abre oportunidades en transporte iónico. Algunos vidrios derivados de ZIFs han mostrado conductividades mejoradas frente a sus homólogos cristalinos, particularmente en sistemas diseñados como electrolitos sólidos o quasi-sólidos.<sup>[61]</sup>

Otro ámbito muy activo es el almacenamiento y conversión de energía. Se han descrito aplicaciones en baterías de litio, tanto como matrices anfitrionas para iones como en composites con nanopartículas activas. La flexibilidad del estado vítreo, la posible generación de sitios accesibles y la ausencia de defectos intergranulares hacen que estos materiales sean especialmente atractivos para arquitecturas electroquímicas avanzadas.<sup>[62]</sup>

Las propiedades ópticas constituyen otra faceta de gran interés. Algunos vidrios de ZIF pueden alcanzar altas transmitancias en el visible y en el infrarrojo cercano cuando se procesan adecuadamente y se evita la formación de burbujas durante la fusión. Esta transparencia, unida a la posibilidad de incorporar centros luminiscentes o de formar composites con materiales semiconductores, abre oportunidades en fotónica y optoelectrónica.<sup>[63,64]</sup> En este sentido, los compuestos híbridos formados por perovskitas y vidrios de ZIF son un ejemplo especialmente llamativo, ya que combinan la emisión de luz de la perovskita con la estabilidad y el encapsulado que ofrece la matriz vítreo.<sup>[65]</sup>

En el ámbito magnético, aunque históricamente ha recibido menor atención que otras propiedades, comienzan a aparecer resultados relevantes en sistemas que incorporan metales de transición. Estos estudios ponen de manifiesto que el desorden topológico, junto con la conservación del orden local, puede

dar lugar a estados magnéticos colectivos poco convencionales, como interacciones antiferromagnéticas en redes desordenadas (Figura 7).<sup>[52]</sup> Este comportamiento sugiere que los vidrios de ZIF pueden actuar como plataformas modelo para estudiar magnetismo en redes amorfas con un alto grado de control químico, lo que constituye una oportunidad especialmente atractiva para el futuro desarrollo del campo.

## Conclusiones

Los ZIFs constituyen una de las familias más ricas y versátiles dentro de los materiales metal-orgánicos. Su semejanza topológica con las zeolitas, unida a la flexibilidad que proporciona la química de coordinación, ha permitido desarrollar una enorme variedad de estructuras, métodos de síntesis y aplicaciones. A diferencia de las zeolitas inorgánicas clásicas, los ZIFs presentan una versatilidad química mucho mayor, ya que es posible modificar tanto el metal como el ligando orgánico para ajustar de forma precisa sus propiedades. Esta flexibilidad sintética ha permitido acceder a un número muy amplio de topologías y a propiedades difícilmente alcanzables en zeolitas convencionales, incluyendo flexibilidad estructural, respuesta dinámica frente a estímulos externos o incluso comportamiento magnético.

La química de los ZIFs ha evolucionado en pocos años desde el estudio de sólidos porosos cristalinos hasta el desarrollo de líquidos, vidrios y composites híbridos avanzados. Más allá de su importancia como materiales cristalinos porosos, los ZIFs han revelado una faceta todavía más sorprendente: su capacidad para acceder a estados amorfos, líquidos y vítreos. Este cambio no ha sido simplemente cuantitativo, en el sentido de ampliar el número de materiales conocidos, sino cualitativo, porque ha transformado la manera en que concebimos los MOFs y su relación con otros estados de la materia. Este comportamiento ha dado lugar a una nueva clase de materiales híbridos que conservan parte de la química local de los MOFs, pero incorporan propiedades propias del estado vítreo, como la ausencia de bordes de grano, la isotropía y una mayor procesabilidad.

El campo se encuentra todavía en una fase temprana. El número de ZIFs realmente fundibles sigue siendo reducido, y muchas de las estrategias actuales para generar vidrios dependen de familias estructurales concretas o de un control composicional fino. Por ello, uno de los grandes retos es ampliar el repertorio de materiales capaces de alcanzar el estado líquido sin descomponerse. Este objetivo no solo incrementaría el abanico de propiedades disponibles, sino que también permitiría adaptar estos materiales a aplicaciones mucho más específicas.

Otro desafío importante es mejorar el control del procesamiento. La formación de burbujas, la descomposición parcial de ligandos o la aparición de heterogeneidades locales siguen siendo limitaciones relevantes en la obtención de vidrios de ZIF de alta calidad. Del mismo modo, será esencial profundizar en la relación entre estructura local, dinámica de fusión y propiedades macroscópicas. En este punto, la combinación de técnicas avanzadas de caracterización y modelización teórica seguirá siendo imprescindible.

Asimismo, el futuro del campo probablemente pasará por la integración de ZIFs vítreos con otras familias de materiales. Los composites con MOFs cristalinos, perovskitas, polímeros, vidrios inorgánicos o nanopartículas funcionales apuntan hacia una ciencia de materiales híbridos en la que el vidrio de ZIF actúe simultáneamente como matriz procesable y componente funcional. Esta capacidad de combinar química reticular, desorden controlado y procesabilidad puede convertir a los ZIFs vítreos en una plataforma especialmente valiosa para el diseño de materiales a medida.

En esta evolución, resulta cada vez más evidente que el futuro del campo podría no limitarse a la vitrificación mediante enfriamiento de un fundido. Los avances más recientes muestran que también es posible acceder directamente a fases vítreas a partir de precursores moleculares, utilizando el propio ligando como medio de reacción y evitando así la necesidad de un precursor cristalino fundible. Este cambio de enfoque amplía de forma notable el espacio composicional accesible, facilita la incorporación de centros metálicos especialmente sensibles, como Fe(II), y reduce los problemas de oxidación y degradación parcial asociados a las rutas térmicas convencionales. Además, abre la puerta al estudio de propiedades hasta ahora prácticamente inexploradas en los vidrios de MOFs, como el antiferromagnetismo en redes topológicamente desordenadas, al tiempo que refuerza sus posibilidades de procesado e integración en dispositivos. Todo ello sugiere que los ZIFs vítreos no deben entenderse únicamente como una extensión de los MOFs cristalinos, sino como una plataforma emergente con identidad propia dentro de la ciencia de materiales híbridos.

En resumen, el estudio de los ZIFs está redefiniendo el papel del desorden en química de materiales y abriendo nuevas oportunidades en separación de gases, energía, óptica y dispositivos funcionales. Aunque todavía existen desafíos importantes, especialmente en la ampliación del número de ZIFs fundibles y en el control del procesado, todo apunta a que los vidrios de ZIF seguirán ocupando un lugar central en la próxima generación de materiales híbridos avanzados.

## Agradecimientos

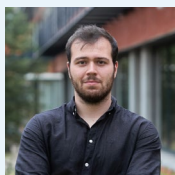
Luis León Alcaide agradece la financiación recibida de la Generalitat Valenciana a través de la ayuda CIAPOS/2024/031.

## Bibliografía

- [1] H. C. J. Zhou, S. Kitagawa, *Chem. Soc. Rev.* **2014**, *43*, 5415–5418, <https://doi.org/10.1039/C4CS90059F>.
- [2] H. C. Zhou, J. R. Long, O. M. Yaghi, *Chem. Rev.* **2012**, *112*, 673–674, <https://doi.org/10.1021/CR300014X>.
- [3] R. Robson, P. Account, *The Chemical Record* **2024**, *24*, e202400038, <https://doi.org/10.1002/TCR.202400038>.
- [4] Z. Zheng, Z. Rong, H. L. Nguyen, O. M. Yaghi, *Inorg. Chem.* **2023**, *62*, 20861–20873, <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.3c02322>.
- [5] K. S. Park, Z. Ni, A. P. Côté, J. Y. Choi, R. Huang, F. J. Uribe-Romo, H. K. Chae, M. O’Keeffe, O. M. Yaghi, *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **2006**, *103*, 10186–10191, <https://doi.org/10.1073/pnas.0602439103>.
- [6] B. Chen, Z. Yang, Y. Zhu, Y. Xia, *J. Mater. Chem. A Mater.* **2014**, *2*, 16811–16831, <https://doi.org/10.1039/C4TA02984D>.
- [7] R. Gaillac, P. Pullumbi, K. A. Beyer, K. Chapman, D. A. Keen, T. D. Bennett, F. X. Coudert, *Nat. Mater.* **2017**, *16*, 1149–1155, <https://doi.org/10.1038/NMAT4998>.
- [8] N. Ma, S. Horike, *Chem. Rev.* **2022**, *122*, 4163–4203, <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.1c00826>.
- [9] Z. Yu, L. Tang, N. Ma, S. Horike, W. Chen, *Coord. Chem. Rev.* **2022**, *469*, 214646, <https://doi.org/10.1016/J.CCR.2022.214646>.
- [10] R. Banerjee, A. Phan, B. Wang, C. Knobler, H. Furukawa, M. O’Keeffe, O. M. Yaghi, *Science*. **2008**, *319*, 939–943, <https://doi.org/10.1126/science.1152516>.
- [11] A. Corma, *Chem. Rev.* **1997**, *97*, 2373–2419, <https://doi.org/10.1021/cr960406n>.
- [12] A. Phan, C. J. Doonan, F. J. Uribe-Romo, C. B. Knobler, M. O’Keeffe, O. M. Yaghi, *Acc. Chem. Res.* **2010**, *43*, 58–67, <https://doi.org/10.1021/ar900116g>.

- [13] X. C. Huang, Y. Y. Lin, J. P. Zhang, X. M. Chen, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2006**, *45*, 1557–1559, <https://doi.org/10.1002/ANIE.200503778>.
- [14] D. Fairen-Jimenez, S. A. Moggach, M. T. Wharmby, P. A. Wright, S. Parsons, T. Düren, *J. Am. Chem. Soc.* **2011**, *133*, 8900–8902, <https://doi.org/10.1021/ja202154j>
- [15] J. Troyano, A. Carné-Sánchez, C. Avci, I. Imaz, D. MasPOCH, *Chem. Soc. Rev.* **2019**, *48*, 5534–5546, <https://doi.org/10.1039/C9CS00472F>.
- [16] J. López-Cabrelles, J. Romero, G. Abellán, M. Giménez-Marqués, M. Palomino, S. Valencia, F. Rey, G. Mínguez Espallargas, *J. Am. Chem. Soc.* **2019**, *141*, 7173–7180, <https://doi.org/10.1021/jacs.9b02686>
- [17] K. Kadota, E. Sivaniyah, S. Bureekaew, S. Kitagawa, S. Horike, *Inorg. Chem.* **2017**, *56*, 8744–8747, <https://doi.org/10.1021/ACS.INORGCHEM.7B01322>.
- [18] Y.-Q. Tian, S.-Y. Yao, D. Gu, K.-H. Cui, D.-W. Guo, G. Zhang, Z.-X. Chen, D.-Y. Zhao, Y.-Q. Tian, S.-Y. Yao, K.-H. Cui, D.-W. Guo, G. Zhang, ] D Gu, Z.-X. Chen, D.-Y. Zhao, *Chemistry – A European Journal* **2010**, *16*, 1137–1141, <https://doi.org/10.1002/CHEM.200902729>.
- [19] S. Horike, K. Kadota, T. Itakura, M. Inukai, S. Kitagawa, *Dalton Transactions* **2015**, *44*, 15107–15110, <https://doi.org/10.1039/C5DT01183C>.
- [20] E. Andres-Garcia, J. López-Cabrelles, L. Oar-Arteta, B. Roldan-Martinez, M. Cano-Padilla, J. Gascon, G. Mínguez Espallargas, F. Kapteijn, *Chemical Engineering Journal* **2019**, *371*, 848–856, <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2019.04.094>.
- [21] K. Noh, J. Lee, J. Kim, *Isr. J. Chem.* **2018**, *58*, 1075–1088, <https://doi.org/10.1002/IJCH.201800107>.
- [22] W. Morris, C. J. Doonan, H. Furukawa, R. Banerjee, O. M. Yaghi, *J. Am. Chem. Soc.* **2008**, *130*, 12626–12627, <https://doi.org/10.1021/ja805222x>
- [23] T. D. Bennett, J. C. Tan, Y. Yue, E. Baxter, C. Ducati, N. J. Terrill, H. H. M. Yeung, Z. Zhou, W. Chen, S. Henke, A. K. Cheetham, G. N. Greaves, *Nat. Commun.* **2015**, *6*, <https://doi.org/10.1038/NCOMMS9079>.
- [24] D. W. Lewis, A. R. Ruiz-Salvador, A. Gómez, L. M. Rodríguez-Albelo, F. X. Coudert, B. Slater, A. K. Cheetham, C. Mellot-Draznieks, *CrystEngComm* **2009**, *11*, 2272–2276, <https://doi.org/10.1039/B912997A>.
- [25] J. López-Cabrelles, E. Miguel-Casañ, M. Esteve-Rochina, E. Andres-Garcia, I. J. Vitorica-Yrezabal, J. Calbo, G. Mínguez Espallargas, *Chem. Sci.* **2022**, *13*, 842–847, <https://doi.org/10.1039/D1SC04779E>.
- [26] N. Novendra, J. M. Marrett, A. D. Katsenis, H. M. Titi, M. Arhangel'skis, T. Friščić, A. Navrotsky, *J. Am. Chem. Soc.* **2020**, *142*, 21720–21729, <https://doi.org/10.1021/jacs.0c09284>.
- [27] H. Hayashi, A. P. Côté, H. Furukawa, M. O'Keeffe, O. M. Yaghi, *Nat. Mat.* **2007**, *6*, 501–506, <https://doi.org/10.1038/nmat1927>.
- [28] S. K. Nune, P. K. Thallapally, A. Dohnalkova, C. Wang, J. Liu, G. J. Exarhos, *Chemical Communications* **2010**, *46*, 4878–4880, <https://doi.org/10.1039/C002088E>.
- [29] J. Cravillon, S. Münzer, S. J. Lohmeier, A. Feldhoff, K. Huber, M. Wiebcke, *Chem. Mater.* **2009**, *21*, 1410–1412, <https://doi.org/10.1021/cm900166h>.
- [30] J. Yao, M. He, K. Wang, R. Chen, Z. Zhong, H. Wang, *CrystEngComm* **2013**, *15*, 3601–3606, <https://doi.org/10.1039/C3CE27093A>.
- [31] H. Bux, F. Liang, Y. Li, J. Cravillon, M. Wiebcke, J. Caro, *J. Am. Chem. Soc.* **2009**, *131*, 16000–16001, <https://doi.org/10.1021/ja907359t>.
- [32] R. E. Morris, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2008**, *47*, 442–444, <https://doi.org/10.1002/ANIE.200704888>.
- [33] P. J. Beldon, L. Fábrián, R. S. Stein, A. Thirumurugan, A. K. Cheetham, T. Friščić, *Angew. Chem. Int. Ed Engl.* **2010**, *49*, 9640–9643, <https://doi.org/10.1002/ANIE.201005547>.
- [34] M. J. Cliffe, C. Mottillo, R. S. Stein, D. K. Bučar, T. Friščić, *Chem. Sci.* **2012**, *3*, 2495–2500, <https://doi.org/10.1039/c2sc20344h>.
- [35] S. J. Rettig, A. Storr, D. A. Summers, R. C. Thompson, J. Trotter, *J. Am. Chem. Soc.* **1997**, *119*, 8675–8680, <https://doi.org/10.1021/ja971558i>.
- [36] S. J. Rettig, A. Storr, D. A. Summers, R. C. Thompson, J. Trotter, *Can. J. Chem.* **1999**, *77*, 425–433, <https://doi.org/10.1139/v99-063>
- [37] I. Stassen, M. Styles, G. Greci, H. Van Gorp, W. Vanderlinden, S. De Feyter, P. Falcaro, D. De Vos, P. Vereecken, R. Ameloot, *Nat. Mat.* **2016**, *15*, 304–310, <https://doi.org/10.1038/nmat4509>.
- [38] T. D. Bennett, A. K. Cheetham, *Acc. Chem. Res.* **2014**, *47*, <https://doi.org/10.1021/ar5000314>.
- [39] T. D. Bennett, S. Cao, J. C. Tan, D. A. Keen, E. G. Bithell, P. J. Beldon, T. Friscic, A. K. Cheetham, *J. Am. Chem. Soc.* **2011**, *133*, 14546–14549, <https://doi.org/10.1021/ja206082s>
- [40] T. D. Bennett, P. Simoncic, S. A. Moggach, F. Gozzo, P. MacChi, D. A. Keen, J. C. Tan, A. K. Cheetham, *Chemical Communications* **2011**, *47*, 7983–7985, <https://doi.org/10.1039/C1CC11985K>.
- [41] S. A. Moggach, T. D. Bennett, A. K. Cheetham, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2009**, *48*, 7087–7089, <https://doi.org/10.1002/ANIE.200902643>.
- [42] T. D. Bennett, F. X. Coudert, S. L. James, A. I. Cooper, *Nat. Mat.* **2021**, *20*, 1179–1187, <https://doi.org/10.1038/s41563-021-00957-w>.
- [43] J. Fonseca, T. Gong, L. Jiao, H. L. Jiang, *J. Mater. Chem. A Mater.* **2021**, *9*, 10562–10611, <https://doi.org/10.1039/D1TA01043C>.
- [44] R. Gaillac, P. Pullumbi, T. D. Bennett, F. X. Coudert, *Chem Mater* **2020**, *32*, 8004–8011, <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.0c02950>.
- [45] R. Gaillac, P. Pullumbi, F. O.-X. Coudert, *J. Phys. Chem. C* **2018**, *122*, *30*, <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.8b00385>.
- [46] T. D. Bennett, Y. Yue, P. Li, A. Qiao, H. Tao, N. G. Greaves, T. Richards, G. I. Lampronti, S. A. T. Redfern, F. Blanc, O. K. Farha, J. T. Hupp, A. K. Cheetham, D. A. Keen, *J. Am. Chem. Soc.* **2016**, *138*, 3484–3492, <https://doi.org/10.1021/JACS.5B13220>.
- [47] T. D. Bennett, S. Horike, J. C. Mauro, M. M. Smedskjaer, L. Wondraczek, *Nat. Mat.* **2024**, *16*, 1755–1766, <https://doi.org/10.1038/s41557-024-01616-8>.
- [48] C. Zhou, M. Stepniewska, L. Longley, C. W. Ashling, P. A. Chater, D. A. Keen, T. D. Bennett, Y. Yue, *Physical Chemistry Chemical Physics* **2018**, *20*, 18291–18296, <https://doi.org/10.1039/C8CP02340A>.
- [49] Z. Shi, A. Arramel, T. D. Bennett, Y. Yue, N. Li, *iScience* **2022**, *25*, <https://doi.org/10.1016/J.ISCI.2022.104351>.
- [50] L. León-Alcaide, C. Castillo-Blas, V. Martin-Diaconescu, I. da Silva, D. A. Keen, T. D. Bennett, G. Mínguez Espallargas, *Chem. Sci.* **2025**, *16*, 7946–7955, <https://doi.org/10.1039/d5sc00767d>.
- [51] R. S. K. Madsen, A. Qiao, J. Sen, I. Hung, K. Chen, Z. Gan, S. Sen, Y. Yue, *Science* **2020**, *367*, 1473–1476, <https://doi.org/10.1126/science.az0251>.
- [52] L. León-Alcaide, L. Martínez-Goyeneche, M. Sessolo, B. J. C. Vieira, J. C. Waerenborgh, J. A. Rodríguez-Velamazán, O. Fabelo, M. J. Cliffe, D. A. Keen, G. Mínguez Espallargas, *Nat. Comm.* **2025**, *16*, 8783, <https://doi.org/10.1038/s41467-025-63837-w>.
- [53] J. M. Tuffnell, C. W. Ashling, J. Hou, S. Li, L. Longley, M. L.

- Ríos Gómez, T. D. Bennett, *Chemical Communications* **2019**, 55, 8705–8715, <https://doi.org/10.1039/c9cc01468c>.
- [54] C. W. Ashling, D. N. Johnstone, R. N. Widmer, J. Hou, S. M. Collins, A. F. Sapnik, A. M. Bumstead, P. A. Midgley, P. A. Chater, D. A. Keen, T. D. Bennett, *J. Am. Chem. Soc.* **2019**, 141, 15641–15648, <https://doi.org/10.1021/jacs.9b07557>.
- [55] C. Zhou, L. Longley, A. Krajnc, G. J. Smales, A. Qiao, I. Erucar, C. M. Doherty, A. W. Thornton, A. J. Hill, C. W. Ashling, O. T. Qazvini, S. J. Lee, P. A. Chater, N. J. Terrill, A. J. Smith, Y. Yue, G. Mali, D. A. Keen, S. G. Telfer, T. D. Bennett, *Nat. Comm.* **2018**, 9, 1–9, <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07532-z>.
- [56] Y. Wang, H. Jin, Q. Ma, K. Mo, H. Mao, A. Feldhoff, X. Cao, Y. Li, F. Pan, Z. Jiang, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2020**, 59, 4365–4369, <https://doi.org/10.1002/anie.201915807>.
- [57] Z. Yang, Y. Belmabkhout, L. N. McHugh, D. Ao, Y. Sun, S. Li, Z. Qiao, T. D. Bennett, M. D. Guiver, C. Zhong, *Nat. Mater.* **2023**, 22, 888–894, <https://doi.org/10.1038/s41563-023-01545-W>.
- [58] O. Smirnova, S. Hwang, R. Sajzew, L. Ge, A. Reupert, V. Nozari, S. Savani, C. Chmelik, M. R. Reithofer, L. Wondraczek, J. Kärger, A. Knebel, *Nat. Mat.* **2023**, 23, 262–270, <https://doi.org/10.1038/s41563-023-01738-3>.
- [59] S. Li, R. Limbach, L. Longley, A. A. Shirzadi, J. C. Walmsley, D. N. Johnstone, P. A. Midgley, L. Wondraczek, T. D. Bennett, *J. Am. Chem. Soc.* **2019**, 141, 1027–1034, <https://doi.org/10.1021/JACS.8B11357>.
- [60] S. S. Sørensen, M. B. Østergaard, M. Stepniewska, H. Johra, Y. Yue, M. M. Smedskjaer, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2020**, 12, 18893–18903, <https://doi.org/10.1021/acsaami.0c02310>.
- [61] R. Lin, X. Li, A. Krajnc, Z. Li, M. Li, W. Wang, L. Zhuang, S. Smart, Z. Zhu, D. Appadoo, J. R. Harmer, Z. Wang, A. G. Buzanich, S. Beyer, L. Wang, G. Mali, T. D. Bennett, V. Chen, J. Hou, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2022**, 61, e202112880, <https://doi.org/10.1002/anie.202112880>.
- [62] X. X. Wang, D. H. Guan, C. L. Miao, J. X. Li, J. Y. Li, X. Y. Yuan, X. Y. Ma, J. J. Xu, *Adv. Energy Mater.* **2024**, 14, 2303829, <https://doi.org/10.1002/aenm.202303829>.
- [63] A. Qiao, H. Tao, M. P. Carson, S. W. Aldrich, L. M. Thirion, T. D. Bennett, J. C. Mauro, Y. Yue, *Opt. Lett.* **2019**, 44, 1623–1625, <https://doi.org/10.1364/OL.44.001623>.
- [64] M. A. Ali, X. Liu, Y. Li, J. Ren, J. Qiu, *Inorg. Chem.* **2020**, 59, 8380–8386, <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.0c00806>.
- [65] J. Hou, P. Chen, A. Shukla, A. Krajnc, T. Wang, X. Li, R. Doasa, L. H. G. Tizei, B. Chan, D. N. Johnstone, R. Lin, T. U. Schüll, I. Martens, D. Appadoo, M. S. Ari, Z. Wang, T. Wei, S. C. Lo, M. Lu, S. Li, E. B. Nandas, G. Mali, A. K. Cheetham, S. M. Collins, V. Chen, L. Wang, T. D. Bennett, *Science*. **2021**, 374, 621–625, <https://doi.org/10.1126/science.abf4460>.



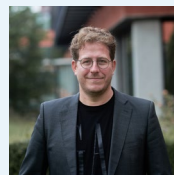
### Luis León Alcaide

Departamento de Ciencia de Materiales y Metalurgia, Universidad de Cambridge

E-mail: [ll824@cam.ac.uk](mailto:ll824@cam.ac.uk)

ORCID: 0000-0003-1667-0618

Luis León Alcaide es investigador postdoctoral en el Department of Materials Science and Metallurgy de la Universidad de Cambridge. Obtuvo su doctorado en el Instituto de Ciencia Molecular (ICMol) de la Universidad de Valencia, donde investigó materiales híbridos metal-orgánicos en diferentes estados, incluyendo fases cristalinas, líquidas y vítreas. Actualmente, su investigación se centra en el desarrollo de nuevas plataformas metal-orgánicas para el estudio de fenómenos cuánticos.



### Guillermo Mínguez Espallargas

Instituto de Ciencia Molecular (ICMol), Universidad de Valencia

E-mail: [guillermo.minguez@uv.es](mailto:guillermo.minguez@uv.es)

ORCID: 0000-0001-7855-1003

Guillermo Mínguez Espallargas es Profesor Titular de Química Inorgánica en la Universidad de Valencia y director del grupo “Crystal Engineering Lab” en el Instituto de Ciencia Molecular (ICMol). Su actividad investigadora se centra en el desarrollo de nuevos materiales de naturaleza híbrida orgánica e inorgánica desde un enfoque de “*crystal engineering*”, para estudiar propiedades fundamentales y sus posibles usos en almacenamiento y separación de gases, como sensores, y en catálisis.