

Los MOF: materiales a la medida
para hacer frente a los desafíos
del siglo xxi

La simplicidad
en la ciencia:
de Newton
a SpaceX

La biotecnología detrás
de la nanotecnología
dermatológica

Cuando la ingeniería trasciende las aulas • Las plantas: fábricas químicas de metabolitos secundarios • ¿Y si tu maquillaje pudiera adaptarse a ti? • Scooters: 100 años de un vehículo a gran velocidad • Con sangre, sudor y lágrimas • El héroe que todos ocupamos alguna vez • El estado del arte de la computación cuántica y el impacto en la encriptación moderna • Endometriosis: La lucha contra el sufrimiento femenino • La IA más allá de tus tareas



LOS MOF: MATERIALES A LA MEDIDA PARA HACER FRENTE A LOS DESAFÍOS DEL SIGLO XXI

AYLIN DENISSE LEE ALEMÁN
Ingeniería Química, 4.º semestre

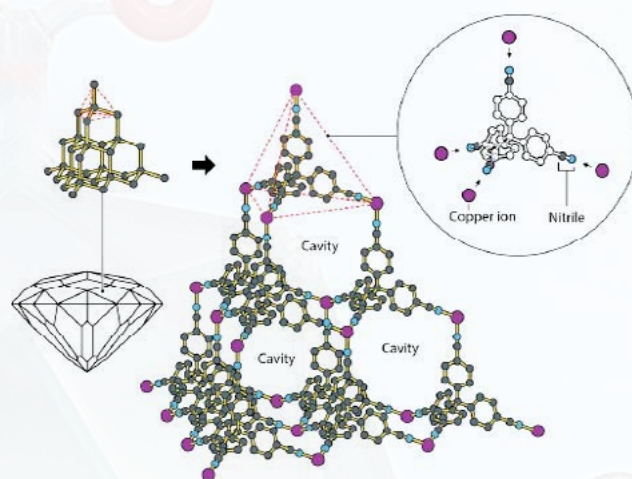
Extraer agua del aire en pleno desierto o capturar la contaminación antes de que llegue al aire ya no es ciencia ficción, es química del siglo XXI. Hoy en día esto es posible gracias a una arquitectura molecular específica, los marcos metal-orgánicos (MOF, por sus siglas en inglés) (Gallar, 2025). Según la Royal Swedish Academy of Sciences (2025), estas estructuras funcionan como andamios moleculares: emplean iones metálicos que hacen la función de pilares fundamentales y largas moléculas orgánicas basadas en carbono como conectores. Juntos, los iones metálicos y las moléculas orgánicas se organizan formando cristales con grandes cavidades en su interior.

Los MOF, al tener esta estructura porosa, son capaces de capturar y almacenar sustancias específicas y, al modificar sus componentes básicos, los químicos pueden diseñarlas para la extracción de sustancias puntuales, además los MOF también son capaces de impulsar reacciones químicas y conducir electricidad (Royal Swedish Academy of Sciences, 2025).

Una investigación colosal realizada por décadas

El camino seguido por este descubrimiento comenzó en 1989, cuando Richard Robson combinó iones de cobre con carga positiva con una molécula orgánica de cuatro ramificaciones formando un cristal inspirado en la for-

ma de un diamante, pero con la peculiaridad de tener una enorme cantidad de cavidades en su estructura; sin embargo, esta estructura era inestable y colapsaba con facilidad. Fue hasta 2003 que Susumu Kitagawa y Omar Yaghi, trabajando por separado, habían oficialmente sentado las bases para sintetizar estos materiales. Kitagawa demostró que los gases pueden entrar y salir de las cavidades estructurales y predijo que los MOF podrían hacerse flexibles. Mientras que Yaghi logró crear un MOF con alta estabilidad y demostró que puede modificarse la estructura para obtener propiedades deseables.



©Johan Järnstedt/The Royal Swedish Academy of Sciences

Figura 1. Primer MOF inspirado en el diamante desarrollado por Richard Robson. Fuente: Järnstedt / Royal Swedish Academy of Sciences (2025).



Sin embargo, no fue sino hasta el año pasado (2025) que los tres científicos mencionados, Susumu Kitagawa, Richard Robson y Omar Yaghi fueron galardonados con el Premio Nobel de Química por haber desarrollado una nueva forma de arquitectura molecular y además demostrado que los MOF pueden contribuir a resolver varios de los desafíos más grandes que afronta la humanidad en la actualidad.

Materiales con propiedades inigualables

Una de las propiedades más interesantes de estas estructuras es su flexibilidad. Esta propiedad no se refiere a que sean estructuras que puedan doblarse como un pedazo de plástico, sino que se habla de una de las propiedades más sorprendentes que posee este grupo de materiales: la capacidad para modificar su estructura molecular de acuerdo con la sustancia que captura en sus poros. A esta propiedad también se la conoce como *respiración*, que hace referencia a la forma en la que la estructura cambia a consecuencia de la adsorción o desorción de huéspedes (materiales que se quedan contenidos dentro de la cavidad de la estructura).

En este tipo de estructuras, la respiración es observable a nivel microscópico. Cuando un huésped entra, el MOF se abre para darle espacio y, una vez que este sale, la estructura se encoge volviendo a su forma original (Alhamami, Doan y Cheng, 2014). Otra de las propiedades fascinantes de los MOF es que pueden presentar superficies internas inmensas capaces de superar los siete mil metros cuadrados por gramo, que es equivalente al área de un campo de fútbol (Chavarro, 2025). Para entender de mejor manera esto, es conveniente armar una imagen mental de cómo se ven los MOF por dentro. Como ya se mencionó antes, son estructuras similares a un andamio con grandes cavidades; así que se podría simplificar esta imagen a los vértices de una figura geométrica, por ejemplo, un cubo. Ahora, si esas estructuras lineales se desar-

maran y se colocaran una tras otra formando un “hilo”, podríamos observar así el área superficial; y si extendiéramos ese hilo enorme sobre un campo de fútbol podríamos ocupar toda la superficie. Los MOF han demostrado ser estructuras excepcionales que experimentan transformaciones reversibles ante estímulos externos como la adsorción de huéspedes, cambios en la temperatura, presión mecánica, irradiación de luz o campos eléctricos (Palach *et al.*, 2021).

Arquitecturas únicas

Para sintetizar cristales de MOF existen diferentes métodos. El método utilizado, junto con condiciones adicionales como pueden ser las proporciones molares de los compuestos precursores, el pH, el disolvente empleado, tiempo de reacción, temperatura, presión, etc., determina características del producto final como su cristalinidad, porosidad, forma y tamaño (González, Montes y Castruita, 2025). Por esa razón, dentro de la familia de los MOF, se tiene una amplia diversidad de estructuras que presentan diferentes propiedades al combinar distintos centros metálicos con diversos ligandos orgánicos. Contando con tantos tipos de MOF, los nombres suelen ser numerosos y complejos, esto explica por qué, para categorizarlos, se emplean acrónimos que indican el lugar donde fueron sintetizados por primera vez, seguido de un número que indica el orden de descubrimiento o el código de laboratorio para esa estructura. Algunos de los acrónimos más comunes son: ZIF (Zeolitic Imidazolate Frameworks), UiO (University of Oslo), MIL (Materials Institute Lavoisier), HKUST (Hong Kong University of Science and Technology) y CAU (Christan-Albrechts-Universitat) (González *et al.*, 2025).

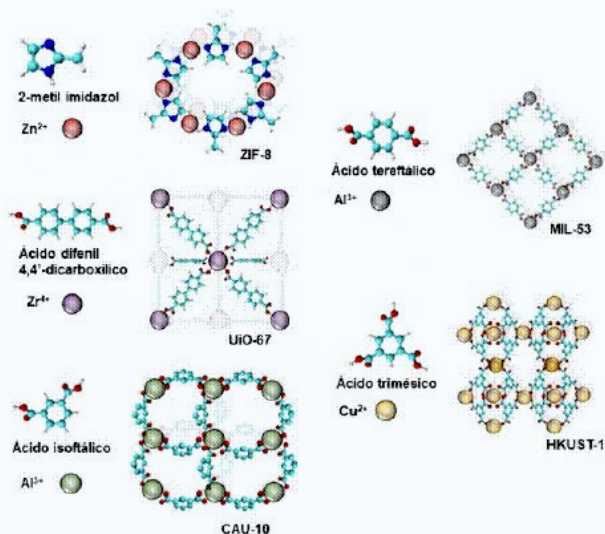


Figura 2. Algunos MOF, sus compuestos precusores y sus nombres. Fuente: González *et al.* (2025).

Los MOF son solucionadores de problemas actuales

Todo este increíble diseño atómico no se queda únicamente en los laboratorios como teoría, pues lo verdaderamente fascinante inicia cuando se usan para resolver problemas que la humanidad afronta en la actualidad. La extracción de agua a partir del aire incluso en zonas desérticas (aire con aproximadamente 30% de humedad) es una de las aplicaciones más interesantes de los MOF. Hoy en día ya existen recolectores que emplean los MOF para absorber la humedad del aire en las noches y al amanecer liberar el agua en forma líquida. El más empleado para este fin es el MOF-303.

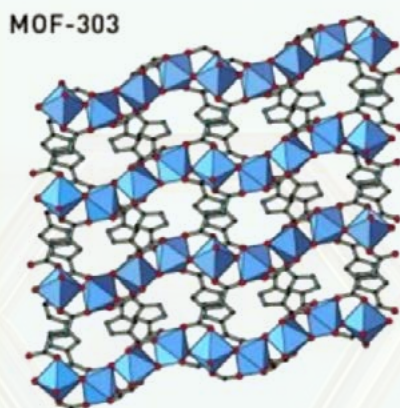


Figura 3. Estructura molecular del MOF-303. Fuente: Royal Swedish Academy of Sciences (2025).

Por otro lado, algunos tipos de MOF también son capaces de extraer el CO₂ y otros gases responsables del calentamiento global directamente del aire. Hoy en día empiezan a surgir empresas como Svante, que han desarrollado filtros de adsorción que emplean los MOF para capturar CO₂ y posteriormente, con ayuda de vapor de contacto directo, eliminarlo del adsorbente. Estos filtros son capaces de capturar hasta el 95% del dióxido de carbono emitido en fuentes industriales. Actualmente, estos filtros están siendo implementados principalmente en plantas de energía y fabricación de cemento, en donde se reaprovecha el CO₂ para la producción energética y, en el caso de los concretos, se inyecta el gas capturado en la mezcla para obtener un producto más resistente. Los MOF más empleados para esto son el MIL-101 y CALF-20 (Svante, 2021).

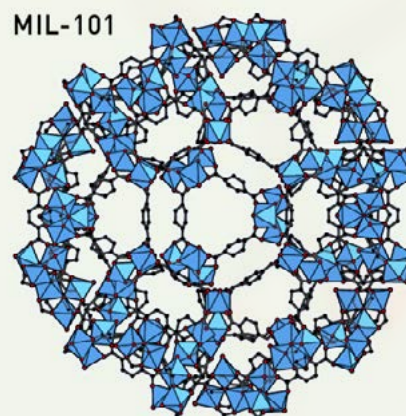


Figura 4. Estructura molecular del MIL-101 y del CALF-20. Fuente: Royal Swedish Academy of Sciences (2025).



De igual forma, los MOF se pueden emplear para capturar contaminantes y purificar agua, como catalizadores en la descomposición del petróleo, para el almacenamiento de hidrógeno, y se está estudiando su potencial para utilizarlos como microcápsulas para transportar fármacos dentro del cuerpo humano.

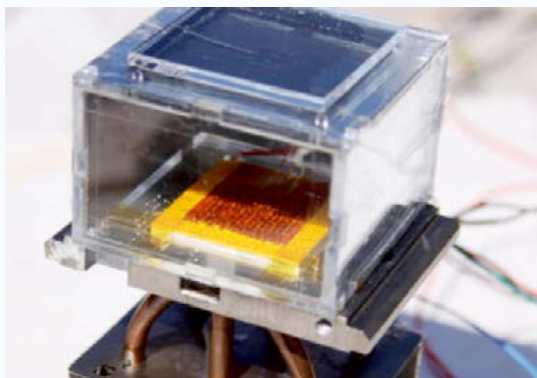


Figura 5. Recolector de agua construido en el MIT que utiliza los MOF para extraer agua del aire seco. Fuente: Sanders (2017).

Lo que comenzó hace tres décadas como un experimento sobre la unión de metales y moléculas orgánicas es hoy en día una de las herramientas más valiosas y prometedoras de la química para buscar soluciones a problemas de inmensa magnitud e impacto global como el cambio climático y la escasez de recursos. Los marcos metal-orgánicos son parte de una nueva era en la ciencia: la era de los materiales diseñados a medida. Este tipo de arquitectura molecular no es solo un interesante invento de laboratorio con propiedades extraordinarias, sino que es un ejemplo de la manera en que la ciencia puede ponerse al servicio de la humanidad y buscar el bien común.

Referencias

- Alhamami, M., Doan, H., y Cheng, C. (2014). A Review on Breathing Behaviors of Metal-Organic-Frameworks (MOFs) for Gas Adsorption. *Materials (Basel)*, 7(4), 3198-3250. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC5453333/>
- Gallar, Á. (2025). Arquitectura molecular para recolectar agua del desierto o capturar dióxido de carbono. *Sapiens*, 13 de octubre. <https://sapiens.umh.es/nobel-de-quimica-armazones-metal-organico/>
- Chavarro, F. (2025). Los marcos metal-orgánicos: una revolución molecular en la química moderna. *Virtualpro*, 9 de octubre. <https://www.virtualpro.co/actualidad/los-marcos-metal-organicos-una-revolucion-molecular-en-la-quimica-moderna-63710>
- González, I., Montes, A., y Castruita, G. (2025). Estructuras metal-orgánicas: síntesis, propiedades y aplicaciones potenciales para la separación de gases y eliminación de contaminantes. *TIP. Revista especializada en ciencias químico-biológicas*, 28. <http://132.248.60.101/index.php/tip/article/view/776>
- Palach, R., Keupp, J., Terlinden, K., et al. (2021). Frustrated flexibility in metal-organic frameworks. *Nature Communications*, 12 (4097). <https://www.nature.com/articles/s41467-021-24188-4>
- Royal Swedish Academy of Sciences (2025). Their molecular architecture contains rooms for chemistry. *Nobel Prize*. <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2025/press-release/>
- Sanders, R. (2017). Device pulls water from dry air, powered only by the sun. *UC Berkeley News*, 13 de abril. <https://news.berkeley.edu/2017/04/13/device-pulls-water-from-dry-air-powered-only-by-the-sun/>
- Svante (2021). MOF Sorbent on a Roll – A Scalable Solution for Gigaton Scale Carbon Capture. *Svante*, 16 de diciembre. <https://www.svanteinc.com/press-releases/a-scalable-solution-for-carbon-capture/>