

El Premio Nobel de Química 2025: la arquitectura en lo invisible

Jorge Antonio Garduño Rojas y Nazario López Cruz

El Dr. Garduño Rojas es Profesor Investigador en el Centro de Investigaciones Químicas de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (CIQ-UAEM) desde 2023. Sus intereses se centran en la química organometálica y en la catálisis con compuestos de metales de transición. El Dr. López Cruz es Profesor Investigador en el CIQ-UAEM desde 2015. Sus intereses se centran en el desarrollo de materiales moleculares y en la activación de moléculas pequeñas mediante compuestos de metales de transición.

Esta publicación fue revisada por el comité editorial de la Academia de Ciencias de Morelos.

El premio Nobel de Química fue anunciado por la Real Academia Sueca de Ciencias durante las primeras horas del miércoles 8 de octubre, y la buena noticia fue para tres científicos que han dedicado sus carreras al desarrollo de las llamadas *redes metal-orgánicas* (Metal-Organic Frameworks o MOFs). Este año, el galardón se comparte entre Richard Robson, Susumu Kitagawa y Omar Yaghi, quienes actualmente son profesores en las universidades de Melbourne, Kioto y California, respectivamente. Estos tres científicos sentaron las bases para un nuevo tipo de arquitectura molecular: “son arquitectos en lo invisible”. Las construcciones que han creado, las redes metal-orgánicas, contienen cavidades, espacios vacíos imperceptibles a nuestros ojos, a través de los cuales pueden fluir gases y otras sustancias. Se dice entonces que las redes metal-orgánicas tienen la capacidad de albergar y liberar distintas moléculas, debido a su naturaleza altamente porosa.

¿Te has preguntado de qué tamaño es una molécula? Las moléculas tienen tamaños variados, pero en general se encuentran entre las diezmillonésimas y las millonésimas de milímetro. En el caso del agua, el hidrógeno, el metano o el dióxido de carbono, que son algunas de las moléculas más pequeñas, sus tamaños se encuentran entre 2 y 4 diezmillonésimas de milímetro (entre 2×10^{-10} y 4×10^{-10} m; o entre 2 y 4 Å). Las cavidades de los MOF pueden medir entre 2 y 50 nanómetros (entre 2×10^{-9} y 50×10^{-9} m), por lo que son lo suficientemente grandes como para permitir que algunas moléculas fluyan a través de ellas, pero lo suficientemente pequeñas como para que nos resulte imposible percibir las con la vista. A través del desarrollo de redes metal-orgánicas, los laureados y la comunidad científica que desde hace décadas dedica sus esfuerzos a esta área, han generado nuevas oportunidades para abordar algunos retos que enfrentamos. Sus aplicaciones incluyen la captación de agua en ambientes áridos, la remoción de contaminantes, la captación de gases y la aceleración de reacciones químicas en el interior de estas redes.

Detrás del Nobel hay moléculas, cadenas y redes... y hasta un pigmento famoso. El hito, ordenar el espacio vacío en la materia

El curador en jefe del Museo del Premio Nobel de Estocolmo, Gustav Källstrand, explica lo que para pocos es intuitivo: un vaso de agua está lleno de moléculas de agua que se mueven en todo momento. A medida que disminuye la temperatura, el movimiento ocurre cada vez más lentamente. Cuando el termómetro indica cero grados, las moléculas de agua se unen entre sí, formando estructuras ordenadas que dan lugar a cristales de hielo. La estructura de estos cristales está determinada por las propiedades de las moléculas que los componen y por las condiciones en las que se formaron. Luego enfatiza: “Si se conocen y se controlan las propiedades, se puede predecir la estructura que

se formará.” Es bien conocido que la estructura de un material puede determinar sus propiedades. Ejemplos comunes y sorprendentes en el entorno son el grafito y el diamante. El primero, usado en lápices, está formado por átomos de carbono acomodados en capas o láminas que pueden deslizarse unas sobre otras, lo que lo hace ideal para la escritura en papel. El diamante también está formado por átomos de carbono y, sin embargo, es el material natural más duro conocido. La diferencia tan abrupta entre las propiedades de ambos materiales se debe a la forma en que los átomos de carbono están acomodados. En el diamante, los átomos se disponen en un arreglo complejo pero regular y muy estable, de tipo reticular. Entender cómo se forman las estructuras de los sólidos, permite utilizar ese conocimiento para crear nuevos tipos de materiales, que no existen en la naturaleza... y es, de cierta manera, donde todo inició para las redes metal-orgánicas. Al final de esta historia, que sigue escribiéndose, lo que los condecorados con el Nobel 2025 descubrieron fue cómo crear nuevos materiales, ¡materiales con porosidades excepcionales! En estos materiales el espacio vacío, antes inútil, está ordenado, e idearon cómo utilizarlos para almacenar y transformar sustancias. La idea de materiales porosos, sin embargo, tiene raíces antiguas. El famoso pigmento azul de Prusia, descubierto en el siglo XVIII, posee una red tridimensional formada por cationes de hierro unidos mediante puentes de átomos de carbono y de nitrógeno. Esta red atrapa agua en su interior. No obstante, el conocimiento para entender y controlar cómo los metales pueden enlazarse con moléculas orgánicas no quedó establecido sino hasta que el químico suizo, Alfred Werner, sentara las bases de la “química de coordinación” que, en una grata coincidencia, le valió el primer premio Nobel otorgado a la química inorgánica en 1913.

Por otro lado, Susumu Kitagawa,

en Japón, y Omar M. Yaghi, en los Estados Unidos, exploraron el uso de racimos de metales, como si fueran vértices, y de compuestos orgánicos como espaciadores de los metales, como si fueran aristas de un mismo sistema geométrico. Kitagawa desarrolló redes en dos dimensiones con cavidades capaces de alojar moléculas pequeñas y estudió cómo estas moléculas fluyen a través de los poros, en otras palabras, cómo entran y salen de la red. Yaghi perfeccionó el uso de espaciadores orgánicos con carga negativa (aniones llamados carboxilatos) y cúmulos formados por varios metales iguales o de más de un tipo para construir estructuras sólidas porosas, tan estables que pueden soportar temperaturas de hasta 300 °C. En lo que se considera un hito en la historia de las redes metal-orgánicas, en 1999, Yaghi presentó el MOF-5, una estructura icónica formada por racimos de iones de zinc (vértices metálicos) y tereftalato (espaciador orgánico).

Radiografías de las contribuciones al Premio Nobel 2025

A finales de los años ochenta, Richard Robson emprendió una tarea ambiciosa: diseñar redes tridimensionales de arquitectura predecible a partir de bloques moleculares bien definidos. Su estrategia consistió en combinar iones metálicos, como el cobre, con moléculas orgánicas con forma tetraédrica, buscando que se ensamblaran en una estructura “inspirada” en la forma en la que los átomos de carbono están dispuestos en el diamante (Figura 1a). Contra toda pronóstico, obtuvo cristales de una

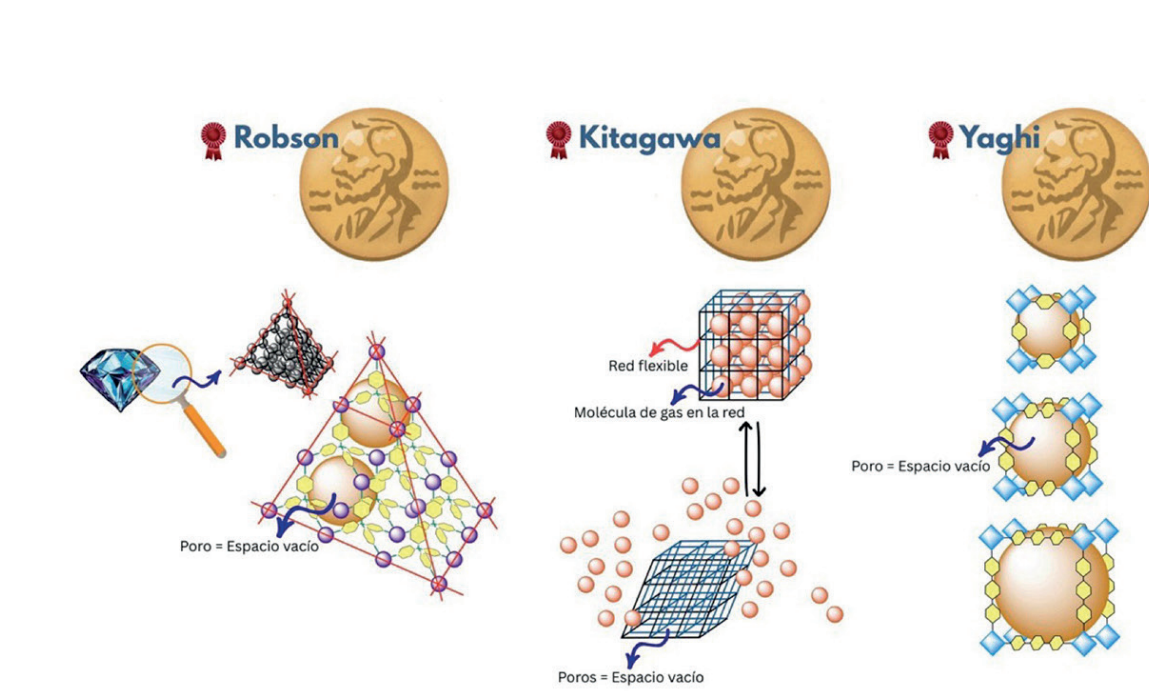


FIGURA 1. ALGUNAS contribuciones de los galardonados a la ciencia de las redes metal-orgánicas. (a) Robson: “inspiración” de la estructura tipo diamante de la red metal-orgánica, con espaciadores de forma tetraédrica. (b) Kitagawa: “respiración” de una red flexible que libera y aloja moléculas de gas. (c) Yaghi: Desarrollo de la química isoreticular: con espaciadores de mayor longitud y vértices idénticos, la estructura de las redes se mantiene, pero el tamaño de los poros aumenta.

red metal-orgánica con la estructura buscada, lo que demuestra la factibilidad de diseñar estructuras tridimensionales de forma racional. No menos importante fue la siguiente diferencia fundamental: a diferencia del diamante, sólido con pocos espacios “huecos” entre sus átomos, el nuevo material está lleno de cavidades amplias, un espacio vacío ordenado, lo que lo hace útil para varias aplicaciones.

Este material mostraba una enorme área superficial, de casi 3000 m² por cada gramo, y su porosidad no cambiaba con el paso del tiempo. En lo sucesivo, Kitagawa y Yaghi establecerían conceptos fundamentales: por un lado, que pueden ser flexibles; por otro, que pueden construirse con “precisión atómica”.

Materiales que respiran

Kitagawa propuso una clasificación de estos materiales. Los hay de *primera generación*, los cuales se colapsan al eliminar las moléculas atrapadas en sus poros; de *segunda generación*, que mantienen su estructura al absorber y liberar moléculas actuando como si fueran “esponjas moleculares”; y los de *tercera generación*, que son flexibles y pueden cambiar de forma, sin colapsar, en respuesta a estímulos externos, entre otros, cambios en la presión, en la temperatura, o en la exposición a la luz. Las redes metal-orgánicas de tercera generación, también conocidas como *cristales blandos porosos*, son materiales sólidos que se comportan como si pudieran “respirar”; es decir, se expanden o se contraen según el entorno al que están expuestas (Figura 1b).

Química reticular: construir con precisión atómica

Yaghi introdujo el concepto de *síntesis reticular* (o *química reticular*), descrito como el proceso de ensamblaje selectivo de bloques

moleculares rígidos (como metales y espaciadores orgánicos) para formar redes tridimensionales pre-determinadas, las cuales se mantienen unidas por enlaces fuertes y duraderos. En este contexto, los MOF se convirtieron en un subconjunto especial de los llamados *polímeros de coordinación*, materiales caracterizados por contener cavidades o poros accesibles. La síntesis reticular permitió diseñar familias completas de materiales con la misma arquitectura, pero con tamaños de poro y propiedades químicas ajustables. Así nacieron las series *isoreticulares*, es decir, materiales con la misma estructura reticular básica, pero con espaciadores de distintos tamaños. Esto permitió controlar propiedades como el tamaño de las cavidades, es decir, volvió posible el ordenamiento del espacio vacío, ahora de tamaño variable (Figura 1c).

Una mina de porosidades: decenas de miles de publicaciones académicas y la posibilidad de aplicaciones relevantes en el contexto global actual

Las redes metal-orgánicas son porosas y sus poros pueden ser llenados por otras sustancias. Y, aunque esto pudiera sonar trivial, sus implicaciones son bastante impresionantes: un solo cubo de MOF del tamaño de un terrón de azúcar puede encerrar una superficie interna equivalente a la de la cancha de un estadio de fútbol asociación (Figura 2). Esto significa que las redes metal-orgánicas pueden almacenar mucho más material en su interior de lo que aparentemente se observa al mirarlas desde el exterior.

Entender el concepto de *superficie interna* es fundamental. En el interior de las redes metal-orgánicas, de manera simplificada podemos pensar que el espacio vacío está ordenado en cavidades de forma regular: los poros. Un ejemplo sencillo sería pensar en pequeños cubos, imperceptibles a nuestra vista, dentro de un cubo más grande, que sí podemos ver. El área o superficie interna de ese arreglo geométrico sería la suma de las áreas de todas las paredes que forman los cubos, por ambos lados, del cubo más grande. Si la cantidad de cubos internos se incrementa, el área superficial también lo hace, y eso es lo que pasa en los materiales altamente porosos, como los MOF. Para hacerlo más gráfico, en el mundo macroscópico podemos encontrar un ejemplo análogo al analizar un poliedro como el cubo (Figura 3). Un cubo de volumen 1 cm³ está formado por caras de 1 cm de longitud. El área o superficie total de este poliedro, sin embargo, es mayor, pues es la suma de las áreas de sus caras tanto interiores como exteriores. En este ejemplo, la superficie total de un cubo de 1 cm de lado es de 12 cm² y su área interna es de 6 cm².

Las redes metal-orgánicas se encuentran entre los materiales más estudiados en las últimas dos dé-

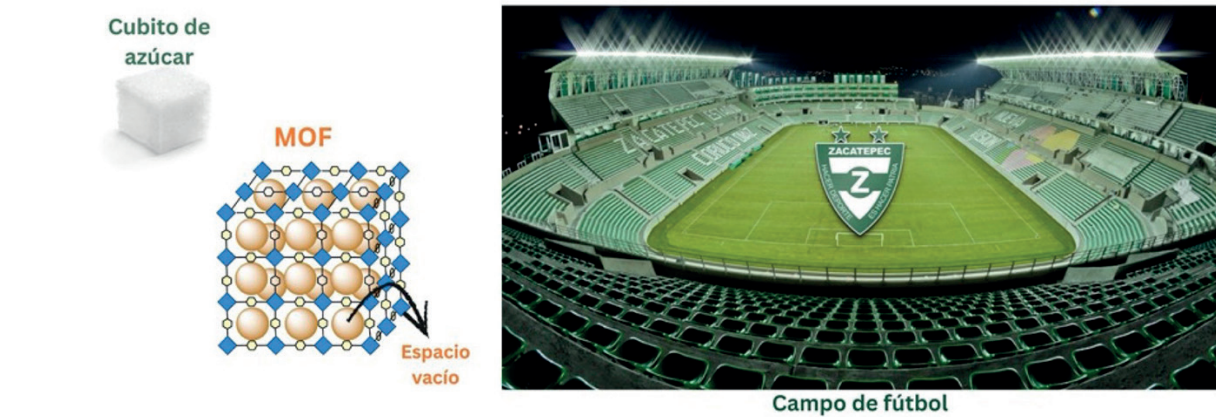


FIGURA 2. UN solo cubo de MOF del tamaño de un terrón de azúcar puede tener una superficie interna equivalente a la de una cancha de fútbol asociación. El escudo y la fotografía del estadio del Club de Fútbol “Zacatepec” fueron tomados de Wikipedia y de zacatepecfc.com, respectivamente.

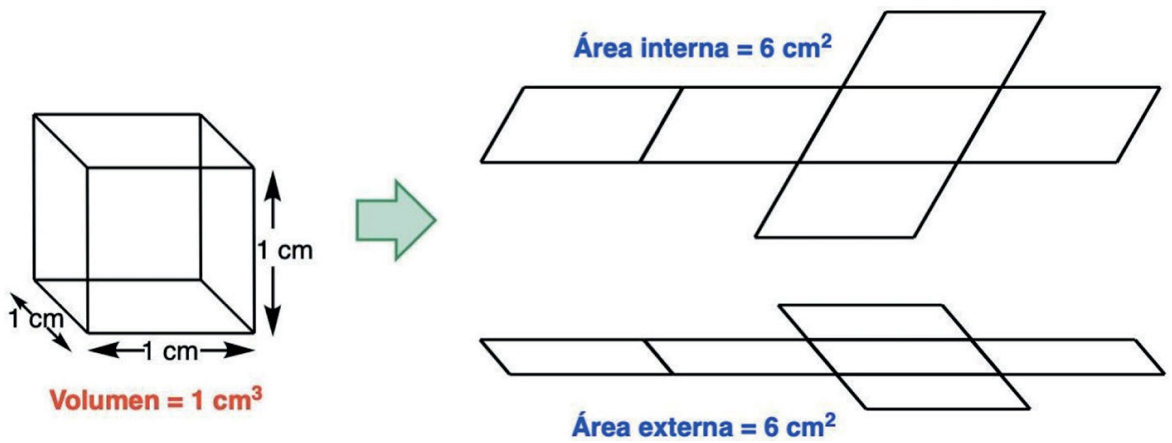


FIGURA 3. LA superficie de un cubo de 1 cm³ de volumen es igual a la suma de las áreas de sus caras interiores y exteriores. En este caso, la superficie total es de 12 cm².

cadadas. Según la revista *Nature*, hasta julio de 2025, estos han sido objeto de más de 100 mil artículos académicos! El atractivo de los MOF reside, probablemente, en su versatilidad. Gracias a su porosidad excepcional y su enorme área superficial, son capaces de almacenar gases como hidrógeno, metano o dióxido de carbono con una eficiencia sin precedentes. Algunas redes metal-orgánicas han demostrado una capacidad de almacenamiento comparable o superior a la de materiales tradicionales como las zeolitas o el carbón activado. Las MOF se emplean para capturar dióxido de carbono, uno de tantos enfoques posibles para contribuir a la mitigación del cambio climático; para purificar agua o para la remoción de contaminantes; para alternativas de energía limpia mediante el almacenamiento de hidrógeno o metano; o en medicina mediante la liberación controlada de fármacos. Algunos, además, pueden absorber agua del aire en regiones áridas, lo que abre posibilidades para un acceso sostenible al recurso más vital de todos. Pero no todo es almacenamiento y algunos de estos materiales, que actúan como conductores eléctricos, tienen aplicación en tecnología de sensores o en baterías. Dentro de algunas redes metal-orgánicas, también pueden ocurrir reacciones químicas. Esto significa que es posible, por ejemplo, introducir alguna sustancia tóxica para que, al salir de la red,

se haya transformado en una sustancia inocua.

El futuro de la química del ordenamiento de los espacios vacíos

En solo tres décadas, las redes metal-orgánicas han transformado la manera en que entendemos los sólidos. Su descubrimiento representa mucho más que un avance técnico: dio paso a una nueva era en la “ingeniería molecular del espacio”, donde los científicos, los arquitectos de lo invisible, no solo crean moléculas, sino los huecos entre ellas: espacio vacío que tiene orden y que se ha vuelto útil. Gracias a la visión de Robson, Kitagawa y Yaghi, hoy es posible diseñar materiales con precisión geométrica, funcionalidad ajustable y propiedades dinámicas. Para Yaghi, “si puedes pensarlo, puedes lograrlo” y, según sus palabras, esto será cada vez más realizable con la ayuda de la inteligencia artificial. Las MOF son, después de todo, arquitecturas invisibles capaces de capturar, filtrar, almacenar y liberar moléculas según nuestras necesidades.

A pesar de la constante expectativa que suele rodear a estos materiales, son pocas las MOF que se producen comercialmente. Una compañía de nombre Svante, en Canadá, ha empezado a utilizarlos en la captura de dióxido de carbono y ha demostrado que la MOF, CALF-20, puede remover gases de efecto invernadero de los sistemas de ventilación utilizados en la producción de cemento. Para Yaghi, esta es “una aplicación increíble”. Otras compañías intentan desarrollar redes metal-orgánicas para coleccionar la poca agua presente en el aire de climas áridos, así como para filtrar o almacenar de forma segura gases tóxicos. Uno de los grandes retos, que no es trivial, en la producción a gran escala de MOF es encontrar la combinación precisa de materias primas para crear una estructura estable con una aplicación específica. Así que, probablemente, la publicación de contenido relacionado con esta área de la química no verá un declive en el futuro próximo. El impacto de estos materiales,

por su potencial en energía limpia, medio ambiente, salud y tecnología, y hoy, con un Nobel en su historia, aunado a los retos que aún enfrenta, los coloca como uno de los temas centrales en la ciencia de nuestros días.

Entérate – Algunos datos sobre los laureados con el Nobel de Química 2025

Richard Robson (Reino Unido-Australia, 1941) es profesor emérito de la Universidad de Melbourne, en Australia. En una entrevista, dijo que muchos no creyeron en su idea al principio: “Algunas personas pensaron que era un sin sentido. Pero no resultó así.” **Susumu Kitagawa** (Japón, 1951) es un profesor en la Universidad de Kioto en Japón. Declaró que, en su trabajo como científico, ha seguido un principio importante: “tratar de ver la utilidad de lo inútil”.

Omar Yaghi (Jordania-EE. UU., 1965) es profesor de la Universidad de California en Berkeley. Llegó a los Estados Unidos como refugiado procedente de Jordania. Descubrió la química hojeando un libro escondido en la biblioteca escolar. Cuando vio las imágenes de las moléculas, quedó fascinado. Leyendo “In the pipeline”, el blog de la editorial *Science*, donde Derek Lowe escribió acerca del Nobel de 2025, resulta llamativo encontrar, entre sus opiniones, que “como en casi todos los premios Nobel en ciencias, hay también una lista de personas que, por una u otra razón, no fueron consideradas para ser parte de la terna ganadora”. Lowe entonces identifica a Makoto Fujita (Tokio, 1957, actualmente profesor en la Universidad de Tokio, Japón) como una de esas personas. Fujita ha dedicado buena parte de su carrera al uso de redes metal-orgánicas como hospederos ordenados para albergar moléculas pequeñas.

Esta columna se prepara y edita semana con semana, en conjunto con investigadores morelenses convencidos del valor del conocimiento científico para el desarrollo social y económico de Morelos.

ESTA PUBLICACIÓN FUE REVISADA POR EL COMITÉ EDITORIAL DE LA ACADEMIA DE CIENCIAS DE MORELOS

Para actividades recientes de la academia y artículos anteriores puede consultar: www.acmor.org ¿Comentarios y sugerencias?, ¿Preguntas sobre temas científicos?

CONTACTANOS: coord.comite.editorial.acmor@gmail.com

REFERENCIAS

1. Nobel Prize in Chemistry 2025. The Nobel Prize. <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/> (último acceso 31 de octubre de 2025).
2. Källstrand, G. Chemistry prize 2025. Nobel Prize lessons. Nobel Prize. YouTube, 15 de octubre de 2025. <https://www.youtube.com/watch?v=JABffny39tg&t=7s>
3. Lowe, D. The 2025 Nobel Prize in Chemistry: Metal-Organic Fra-

meworks. En el pipeline del 8 de octubre de 2025. <https://www.science.org/content/blog-post/2025-nobel-prize-chemistry-metal-organic-frameworks>- 4. The 2025 chemistry prize – MOFs – molecular structures. Nobel Prize Outreach 2025. <https://www.nobelprize.org/the-2025-chemistry-prize-mofs-molecular-structures/> (último acceso 31 de octubre de 2025)
- 5. Castelvécchi, D.; Naddaf, M. Chemistry Nobel for scientists who developed massively porous ‘super sponge’ materials. *Nature News*, 8 de octubre de 2025. [https://www.nature.com/arti-](https://www.nature.com/articles/d41586-025-03195-1)

[cles/d41586-025-03195-1](https://www.nature.com/arti-cles/d41586-025-03195-1)

6. Ramström, O. Metal-Organic Frameworks. Scientific Background to the Nobel Prize in Chemistry 2025. The Nobel Committee for Chemistry. The Royal Swedish Academy of Sciences, 8 de octubre de 2025. <https://www.nobelprize.org/uploads/2025/10/advanced-chemistryprize2025-1.pdf>
7. Marcus, Y. The sizes of molecules–revisited. *J. Phys. Org. Chem.* 2003, 16, 398-408. <https://doi.org/10.1002/poc.651>