

Capturar el CO_2 con materiales tan pequeños como una partícula de polvo

Cecilia Manrique Hernández

Química y doctora en Ciencias Químicas
alba.manrique@udea.edu.co

Laura Cristina Urán Castaño

Ingeniería Química y doctora en Ciencias Químicas
laura.uran@udea.edu.co

Forma microscópica del MOF en forma de rosa, rodeado de la zeolita; visualizados por microscopía electrónica de barrido. *Fotografía: cortesía del grupo de investigación.*

Imagina una diminuta red capaz de atrapar uno de los gases que altera nuestro clima. Las tecnologías de captura de dióxido de carbono se valen del estudio de materiales híbridos que logran adsorber —distinto a absorber¹— y retener moléculas de forma específica.

¹ «Dicho de un cuerpo: Atraer y retener en su superficie moléculas o iones de otro cuerpo». Real Academia Española. (2023). Diccionario de la lengua española. Tomado el 17 de marzo de 2025 de <https://dle.rae.es>



n gas presente en nuestras exhalaciones, en los volcanes, en la combustión de la leña, en el exhosto de los carros y camiones y, en general, en la quema de combustibles fósiles se encuentra en un tremendo desequilibrio. El dióxido de carbono (CO₂), ese gas esencial para la vida en la Tierra, ha traído también uno de los mayores desafíos planetarios al alcanzar concentraciones ahora nocivas para la salud y críticas para las dinámicas climáticas globales. Los impactos más conocidos del exceso de este gas en la atmósfera son el aumento global de la temperatura, la acidificación de los océanos —con consecuencias directas como la muerte de los corales y la puesta en riesgo de la vida marina en general— y los eventos de precipitación y sequías extremas. El planeta captura el dióxido de carbono de forma natural de muchas formas: a través del océano por procesos de absorción y de las algas y los bosques por fotosíntesis. Esto tiene que ver con el ciclo natural del carbono en el que algunos procesos geológicos, biológicos o antrópicos producen CO₂; otros, como las dinámicas hidroclimáticas, lo circulan, y otros lo capturan para completar el ciclo.

Sin embargo, como lo ha constatado el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, la actividad humana desde las épocas preindustriales, hacia el año 1750, ha roto el delicado equilibrio del efecto invernadero del que hace parte el CO₂ (al igual que otros gases), cuyo exceso —150 % más alto hoy que en el siglo XVIII— se ha convertido en uno de los principales problemas mundiales de la ingeniería y la política ambiental global.

La captura segura del CO₂

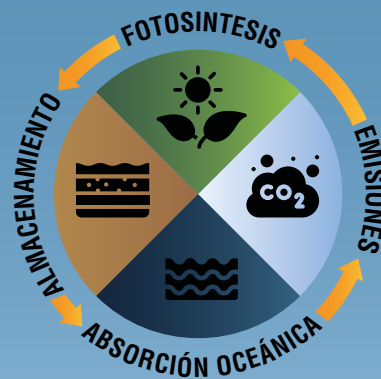
Uno de los mayores retos frente a este desafío tiene que ver con acciones climáticas globales que disminuyan los gases de efecto invernadero para 2050 —como las planteadas en los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU—. Estas incluyen la adopción de sistemas eléctricos renovables, vehículos sin emisiones, una agricultura neutra en emisiones y el desarrollo de tecnologías para la captura del CO₂. En este último punto es que el grupo de investigación de la Universidad de Antioquia Catalizadores y Adsorbentes trabaja para proponer alternativas que contribuyan a la mitigación del cambio climático.

En el mundo existen acciones para capturar el CO₂ producido por las grandes industrias y almacenarlo en formaciones geológicas, pero, aunque ha mostrado ser una técnica efectiva, presenta riesgos, como la posible fuga del CO₂ o la contaminación de acuíferos subterráneos, lo cual podría afectar la calidad del agua potable. Por eso, una de las tareas urgentes de la ingeniería y las ciencias básicas del momento es proponer soluciones que permitan capturar este gas en sitios puntuales, y no necesariamente industriales.

Para lograrlo es importante crear tecnologías capaces de eliminarlo en lugares donde su presencia sea baja. Esto incluye su captura en fuentes móviles (como automóviles) y en las trazas presentes en el aire, lo cual es crucial tanto para el control de CO₂ en la atmósfera como para la calidad del aire en espacios confinados, como sótanos, túneles, oficinas y otros entornos cerrados. En consecuencia, la captura aérea directa parece ser un enfoque contribuyente para reducir la concentración de CO₂.

CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DEL CO₂

El ciclo del carbono implica el movimiento continuo del carbono entre la atmósfera y la Tierra, manteniendo un equilibrio natural. Sin embargo, las actividades industriales generan un exceso de CO₂ que supera la capacidad de absorción del planeta, provocando desequilibrios y contribuyendo al calentamiento global.



CICLO CO₂

EMISIONES:

Liberación de CO₂ a la atmósfera por procesos naturales y humanos.

FOTOSÍNTESIS:

Las plantas capturan CO₂ para producir oxígeno y energía.

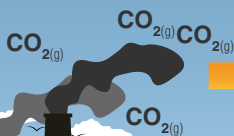
ALMACENAMIENTO:

El carbono se guarda en océanos, suelos y combustibles fósiles.

ABSORCIÓN OCEÁNICA:

Los océanos absorben CO₂, ayudando a regular su cantidad en la atmósfera.

En la industria, el CO₂ se captura usando sustancias químicas poco amigables con el medio ambiente y que pueden generar subproductos tóxicos, contribuir a la degradación ambiental.



BOSQUES

Los árboles y plantas absorben CO₂ durante el proceso de fotosíntesis.

OCEANO

Los océanos absorben aproximadamente un cuarto del CO₂ emitido por actividades humanas, sin embargo, puede causar acidificación del agua.

ALGAS

Al igual que los árboles, las algas marinas realizan la fotosíntesis, capturando CO₂.

BALLENAS

La popó de las ballenas fertiliza el fitoplancton, que absorbe CO₂ mediante fotosíntesis. Al morir, parte de este carbono se hunde al fondo del océano, almacenándose durante siglos. Así, las ballenas contribuyen indirectamente a reducir el CO₂ en la atmósfera y a combatir el cambio climático.

Una vez capturado, el CO₂ se transporta a través de tuberías o se envía en barcos para depositarlo en antiguos yacimientos de petróleo, o en capas profundas de la tierra.

CO₂ mezclado con agua (CO_{2(g)} hidratado)

Una posible fuga del CO₂ o la contaminación de acuíferos subterráneos, podría afectar la calidad del agua potable.

MATERIALES COMBINADOS

ZEOLITA

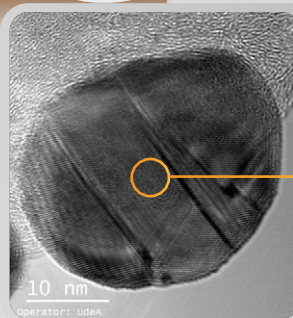
REDES METAL ORGÁNICAS

Zeolitas /redes metal orgánicas para mejorar las propiedades químicas de un material final.

MOF/ ZEOLITA

ADSORCIÓN DE CO₂ EN MATERIALES POROSOS SINTÉTICOS

Los materiales porosos son una opción muy interesante para ayudar al planeta a reducir el CO₂. Estos materiales tienen pequeños agujeros en su estructura que pueden atrapar el gas y evitar que se libere a la atmósfera.



CONCLUSION



El uso de materiales sólidos porosos, como las redes metal-orgánicas y las zeolitas, es una opción interesante para capturar CO₂ porque son mucho más amigables con el medio ambiente que los productos químicos que se usan hoy en día. Además, estos materiales porosos se pueden reutilizar varias veces para capturar el gas sin perder su desempeño, lo que significa que generan menos desechos. Esto contribuiría a combatir el cambio climático de manera más eficiente.

Hacia la síntesis de materiales porosos híbridos para la captura de CO₂

Entre los numerosos estudios en curso, se están investigando sólidos porosos —pensemos en una piedra pómez o en una esponja de la cocina— que tienen canales internos que permiten la captura y almacenamiento de CO₂.

La Universidad de Antioquia, en su tarea de enfrentar el cambio climático a través de proyectos de creación, investigación e innovación, ha vinculado estos esfuerzos con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU, especialmente con el objetivo 13: «Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos». En este sentido, el grupo de investigación se ha dedicado a desarrollar nuevos materiales sólidos para la captura de CO₂ y su transformación en productos de mayor valor.

El conjunto de materiales que se han estudiado están basados en materiales sólidos adsorbentes —como los que tienen poros capaces de capturar diferentes tipos de sustancias gaseosas o líquidas—, específicamente en materiales de tipo redes metal-orgánicas, que están conformadas tanto por metales como el cobre, el cromo, el manganeso, el cobalto, el níquel (los más económicos) como por compuestos orgánicos. Estos materiales se han combinado con zeolitas, un tipo de material natural compuesto principalmente por silicio (Si), aluminio (Al) y sodio (Na) y presente en los depósitos volcánicos. En su forma sintética, o sea preparada en el laboratorio, nos ha permitido el estudio de sus propiedades porosas y de estabilidad térmica. La combinación de ambos materiales ha dado lugar a la obtención de un único material zeolita/red metal-orgánica, lo que ha permitido analizar su capacidad para adsorber moléculas específicas como el CO₂.

Para que los sólidos porosos sean eficaces deben ser altamente selectivos hacia el CO₂, es decir,

deben adsorber preferentemente el dióxido de carbono sobre otras moléculas presentes en el aire, como el nitrógeno o el oxígeno, y poseer estabilidad térmica para resistir altas temperaturas, como las generadas en los gases de escape de automóviles (mayores a 300 °C). Aunque los materiales de redes metal-orgánicas son selectivos hacia el CO₂, suelen ser inestables térmicamente y se descomponen a temperaturas bajas, lo que limita su aplicación. Por el contrario, las zeolitas pueden soportar temperaturas superiores a 500 °C, lo que las hace adecuadas para su aplicación a diferentes temperaturas. Combinar los materiales de redes metal-orgánicas con zeolitas podría ofrecer un material híbrido que sea selectivo hacia el CO₂ y, a su vez, capaz de resistir altas temperaturas gracias a la estabilidad térmica proporcionada por las zeolitas.

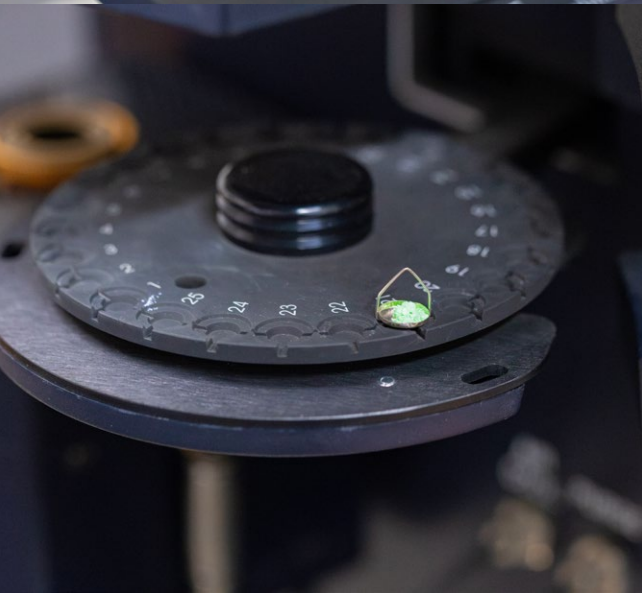
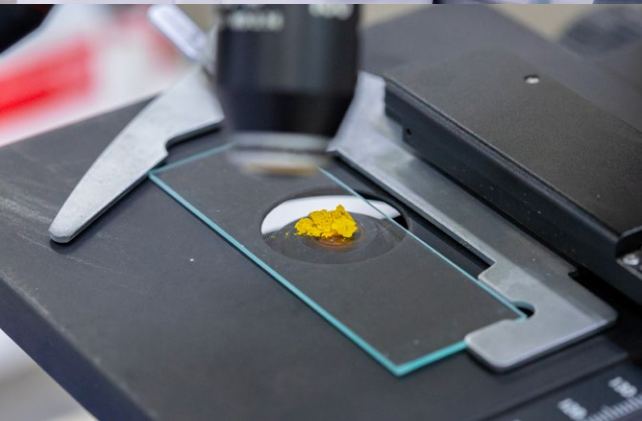
En el grupo de investigación se realizó la preparación o síntesis de las redes metal-orgá-

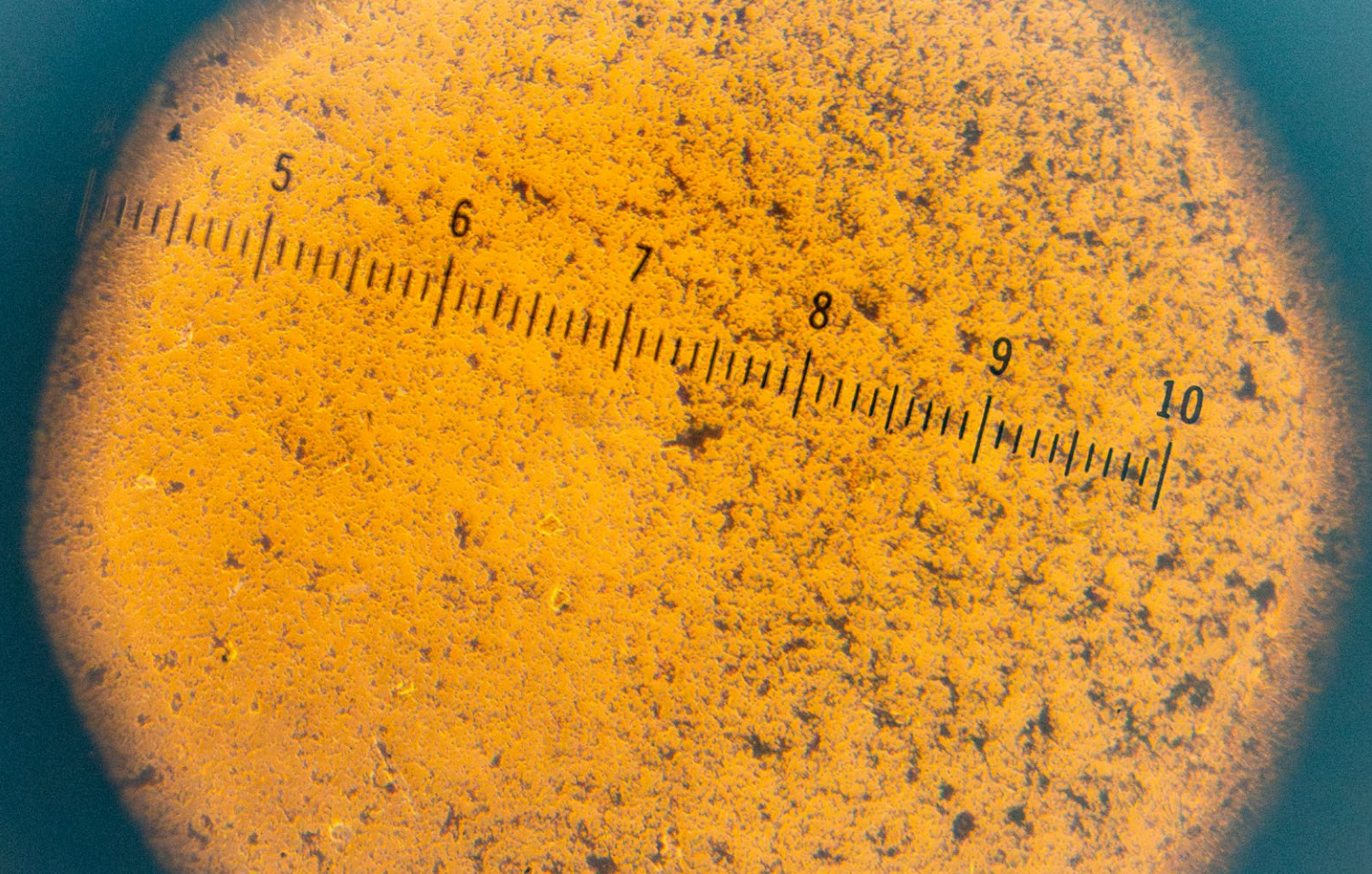
Arriba

Mezcla de reactivos en el laboratorio para formar materiales sólidos. Los reactivos se combinan para obtener materiales sólidos de diferentes colores, dependiendo del metal utilizado.
Fotografía: Alejandra Uribe Fernández, Dirección de Comunicaciones.

Abajo

Observación del material sólido bajo el microscopio. El material sólido se analiza en el microscopio para estudiar su tamaño y forma.
Fotografía: Alejandra Uribe Fernández, Dirección de Comunicaciones.





Observación del sólido bajo el microscopio. Algunas partículas del sólido son lo suficientemente grandes como para observar su forma geométrica cuadrada.

Fotografía: Alejandra Uribe Fernández, Dirección de Comunicaciones.

nicas con los metales de transición de magnesio (Mg) y níquel (Ni), y su combinación en diferentes proporciones. Este proceso se llevó a cabo a temperaturas cercanas a 125 °C con un tiempo de síntesis de entre 12 y 24 horas. Estas condiciones son destacables ya que en la literatura se reportan tiempos de síntesis mayores a 24 horas. Cuando el material de redes metal-orgánicas sin zeolita se sometió a una temperatura cercana a los 300 °C, se mantuvo íntegro en su estructura en un 60 %, mientras que cuando se combinó con la zeolita y se probó a la misma temperatura, se mantuvo en un 80 %. Esta resistencia térmica es un resultado prometedor, ya que estos materiales podrían aplicarse en procesos o ambientes donde halla altas temperaturas y condiciones agrestes, como la presencia de metales pesados o contaminantes en el agua.

¿Qué tanto CO₂ podría adsorber este material?

Los sólidos obtenidos se evaluaron en su capacidad para capturar CO₂, inicialmente a temperatura ambiente y presión atmosférica, con el propósito de determinar su habilidad para capturar las trazas que estén presentes en

el aire. Los resultados obtenidos mostraron que los sólidos capturaron cantidades de CO₂ entre 3 y 5 mmol de gas por cada gramo de sólido utilizado. Esto se traduce en aproximadamente en 132 mg para 3 mmol y 220 mg para 5 mmol de gas, lo que se considera un rendimiento aceptable desde el punto de vista científico. El éxito de este trabajo no solo radica en la eficiencia y rapidez del proceso de síntesis, sino también en la calidad y estabilidad de los sólidos obtenidos, lo que abre nuevas posibilidades para la investigación y el desarrollo de materiales novedosos con aplicaciones ambientales. Las evaluaciones preliminares de las redes metal-orgánicas y zeolitas para la

adsorción de CO₂ muestra un potencial para la captura de gases en el aire. Igualmente, los resultados de la combinación zeolita/redes metal-orgánicas indican que esta mezcla es beneficiosa para la adsorción de CO₂, pues cuenta con mayor estabilidad térmica.

Con el desarrollo de este proyecto, hemos aprendido que la combinación de zeolitas y de las redes metal-orgánicas es una estrategia prometedora para capturar CO₂ y otros contaminantes ambientales, pues ofrecen alta capacidad de adsorción y selectividad, mientras que las zeolitas aportan estabilidad térmica para condiciones extremas. La capacidad de trabajo conjunto de estos materiales permite crear compuestos que capturan eficientemente el CO₂ y mantienen su integridad a altas temperaturas, ampliando las aplicaciones potenciales.

Esta iniciativa del grupo tiene como objetivo seguir avanzando en la búsqueda de sólidos que permitan capturar una mayor cantidad de CO₂ que sea más atractiva, lo que permitiría llevarla a aplicaciones concretas para contribuir efectivamente a mitigar las emisiones de este gas. Este proyecto representa una de las múltiples estrategias que necesitamos desarrollar para lograr la reducción de emisiones que se definió en el Acuerdo de París el 12 de diciembre de 2015, durante la Conferencia de las Partes (COP21) en París, Francia. ✕

Glosario

Ácidos carboxílicos: Compuestos orgánicos que contienen el grupo funcional carboxilo (-COOH) fundamentales en procesos bioquímicos y síntesis química.

Adsorbentes: Materiales sólidos con estructura porosa que tienen la capacidad de adherir moléculas en su superficie al permitir la captura selectiva de diferentes tipos de sustancias gaseosas o líquidas.

Compuesto orgánico: Compuesto químico que contiene principalmente átomos de carbono e hidrógeno, a menudo en combinación con otros elementos como oxígeno, nitrógeno, y halógenos.

Degradación térmica: Proceso mediante el cual un material pierde sus propiedades químicas o físicas debido a la exposición a altas temperaturas, lo que puede provocar su descomposición o cambios estructurales.

Estructura microporosa: Materiales sólidos que tienen poros con diámetro menor de 2 nanómetros.

Materiales híbridos: Materiales formados por la combinación de componentes de diferentes naturalezas que proporcionan propiedades mejoradas o nuevas funcionalidades en comparación con los componentes individuales.

Metales de transición: Elementos químicos ubicados en el bloque d de la tabla periódica, caracterizados por su capacidad de formar múltiples estados de oxidación y presentar propiedades metálicas variables.

Redes metal orgánicas: Materiales sólidos porosos conformados por metales y compuestos orgánicos.

Resistencia: Capacidad de un material para soportar condiciones adversas sin sufrir deformación o daño estructural significativo.

Síntesis: Proceso realizado para crear un compuesto o material a partir de sustancias más simples mediante reacciones químicas controladas.

Zeolitas: Materiales sólidos porosos que contienen principalmente aluminio, silicio y oxígeno.

Este texto se deriva del proyecto de investigación Captura de CO₂ con adsorbentes híbridos en corrientes de gases de combustión provenientes de fuentes móviles como alternativa para mitigar el cambio climático, 2022-55551, financiado por el Comité para el Desarrollo de la Investigación -CODI. Convocatoria para proyectos de Investigación Temática 2022: Ciencia e innovación en respuesta a los desafíos asociados al cambio climático.