



# Materiales porosos funcionales como alternativa para enfrentar la contaminación generada por agroquímicos

Berenice González Santiago  
Ana Adela Lemus Santana

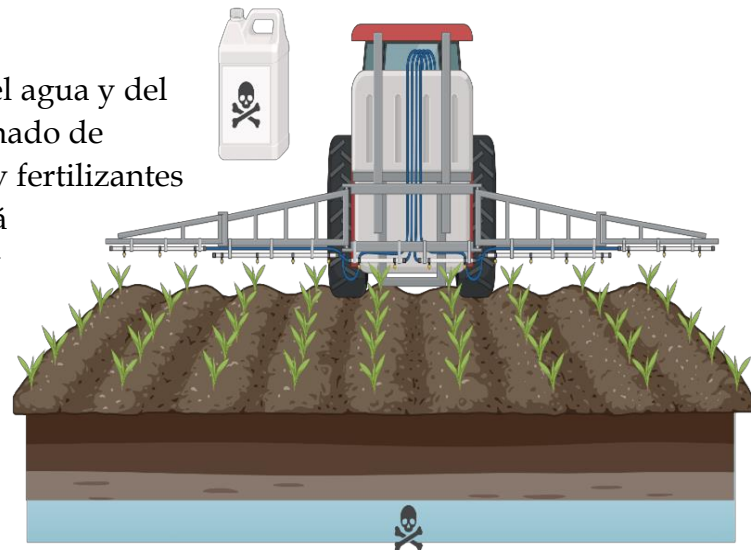
Instituto Politécnico Nacional, Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada Unidad Legaria (CICATA-Legaria).

\*Autor para correspondencia: gonzsbe@gmail.com

Ante la problemática ocasionada por el uso de agroquímicos y la búsqueda de medidas alternativas para la mitigación asociadas al agua y al suelo, emergen los materiales porosos funcionales. Particularmente, los materiales de naturaleza híbrida metal-orgánica estructurada que, al utilizarse como adsorbentes, permite la remoción de herbicidas en disolución y pueden funcionar como plataformas inteligentes para la liberación controlada de fertilizantes. Estas dos cualidades, la adsorción y almacenamiento, hace que estos materiales híbridos sean alternativas competentes para problemas de remediación. Por lo cual, en el presente trabajo se discute el alcance y definición de estos materiales, se abordan sus aplicaciones en la agricultura, las cuales incluyen remoción de herbicidas, el transporte y liberación de fertilizantes.

## Introducción

Los análisis recientes de la contaminación del agua y del suelo han demostrado que el uso indiscriminado de agroquímicos como insecticidas, herbicidas y fertilizantes está causando daños al medio ambiente. Está documentado que desde la década de 1990 y como resultado de la revolución verde, se modificaron los modelos o estilos de la producción agrícola, esto decanto en un incremento del uso de agroquímicos ocasionando gran impacto en la economía y el rendimiento de los cultivos.





**El uso excesivo de herbicidas y fertilizantes afecta la biodiversidad y la calidad del agua, lo cual ocasiona efectos nocivos para la salud humana y el medio ambiente.**

Es cierto que las tierras necesitan nutrientes para tener un mejor rendimiento en los cultivos y también es necesario el uso de pesticidas herbicidas para controlar las malezas que afectan el desarrollo de las plantas. Pero el uso sin control tiene graves consecuencias ambientales por la forma en que se aplican como son la pulverización, el rociado y la distribución en el suelo, lo cual genera residuos en el ambiente.

Si se observa un pedazo de tierra o cuerpo de agua, a simple vista parecerá en buen estado, pero a nivel microscópico presenta alteraciones provocadas por el uso de agroquímicos. Tal es el caso de los cuerpos de agua, donde se han identificado restos de herbicidas. La presencia de agroquímicos tiene diversos impactos ambientales, por ejemplo, la disminución de la disponibilidad de hierbas comestibles silvestres, las cuales han formado parte de la dieta tradicional de comunidades agrícolas por generaciones. Es decir, se está destruyendo la biodiversidad además de afectar la calidad del agua (Fig. 1) como consecuencia del uso excesivo de agroquímicos.



**Figura 1.** Problemática en los cuerpos de agua y suelos generada por el uso de agroquímicos.



## Desarrollo

### Aspectos funcionales de los materiales porosos

Al mismo tiempo que la limpieza de las aguas contaminadas por herbicidas y pesticidas es un reto apremiante, también lo es la administración de agroquímicos. Particularmente, en el tratamiento del agua los métodos son costosos, requiere mucho tiempo y, a menudo son insuficientes. Entre los métodos reportados para la remoción de herbicidas en disolución se encuentran el uso de biodegradación enzimática, degradación fotocatalítica, cloración, ozonización, clarificación, filtración por el uso de membranas o materiales porosos adsorbentes. La propiedad que tienen algunos materiales al ser traspasados por agua, aire, calor, así como especies lo suficientemente pequeñas o ligeras, para caber dentro de sus

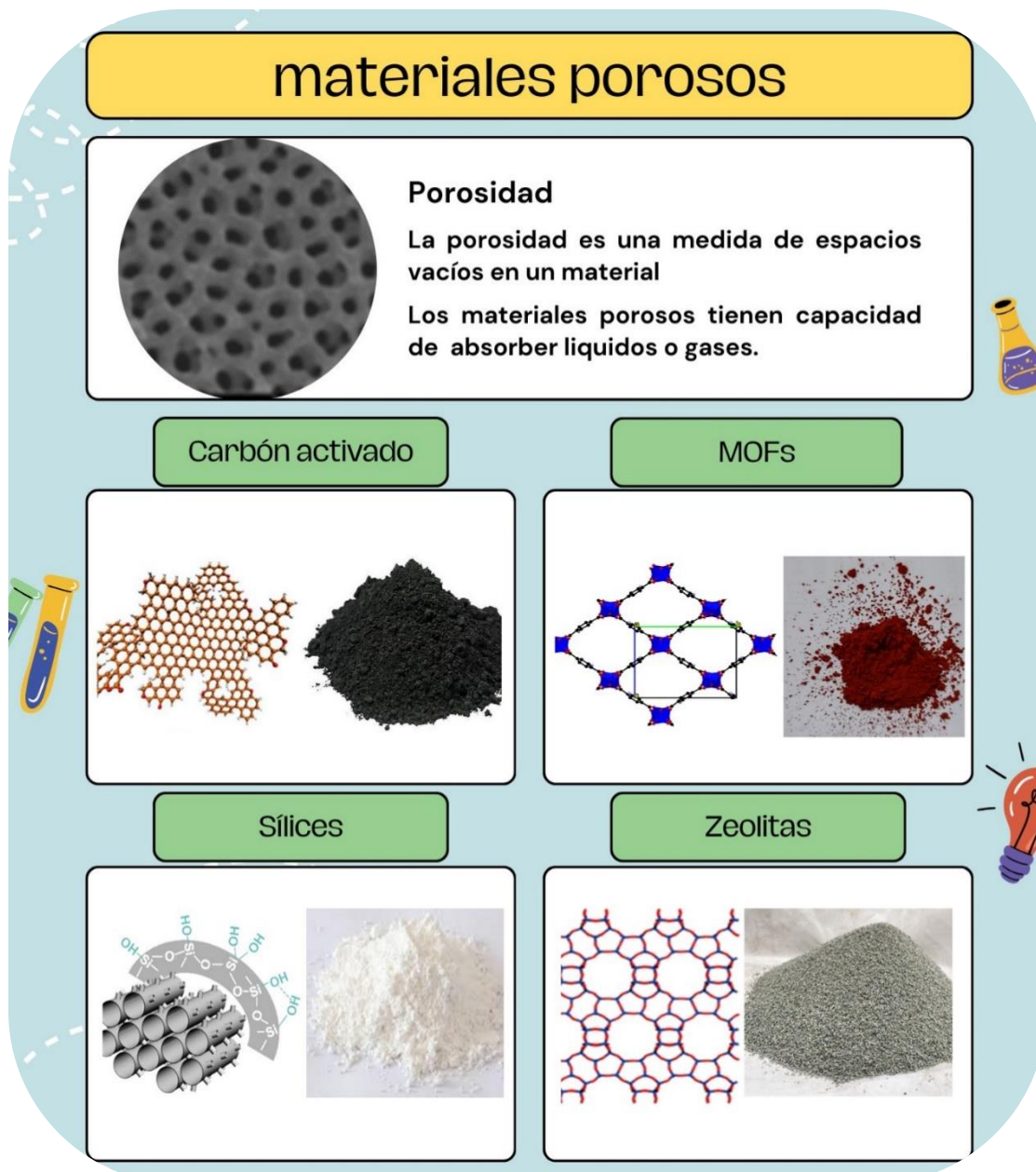
huecos accesibles, se llama porosidad. En este contexto, hay materiales funcionales que al usarse como adsorbentes para remover compuestos tóxicos en disoluciones resultan prometedores, pues su uso es fácil, así como su recuperación, e incluso, su reciclabilidad.

Las zeolitas, sílices, y el carbón activado son algunos ejemplos de materiales porosos que se han evaluado como adsorbentes para enfrentar la problemática presentada por los agroquímicos, sin embargo, sus temperaturas de activación son altas o existe poca compatibilidad con la molécula de interés, ya sea porque sus cavidades o tamaño de poro limitan sus aplicaciones.

En la búsqueda de materiales alternativos, a finales de la década de 1990 emergió una clase de sólidos porosos denominados enrejados metal-orgánicos MOFs (Metal-organic frameworks, siglas en inglés), materiales de naturaleza híbrida que superan en porosidad y propiedades a los materiales porosos clásicos. Los estudios sobre adsorción y remoción de pesticidas utilizando materiales funcionales MOFs han demostrado buena eficiencia, con capacidades de adsorción altas y viabilidad para reutilizarse. En la Figura 2 se visualizan los materiales porosos como las zeolitas, sílice, carbón activado y MOFs, su apariencia y estructura química general.

**Los materiales híbridos pueden ser usados como adsorbentes para remover compuestos tóxicos identificados en cuerpos de agua.**

**Lo materiales porosos denominados enrejados metal-orgánicos son opciones competentes para aplicaciones agrícolas, como la eliminación de restos de atrazina y glifosato.**



**Figura 2.** Sólidos porosos utilizados en adsorción de herbicidas

Los enrejados metal-orgánicos son formados por la unión de centros metálicos (iones metálicos) y los ligantes puente (inicialmente ácidos orgánicos di o tricarbónicos), los cuales se encuentran unidos a través de enlaces de coordinación. Estos materiales han tenido auge en los últimos años y sus usos como adsorbentes han superado a otros sólidos porosos. Por su gran área superficial, variedad en tamaños y forma de sus cavidades, pueden alojar moléculas huésped de interés.



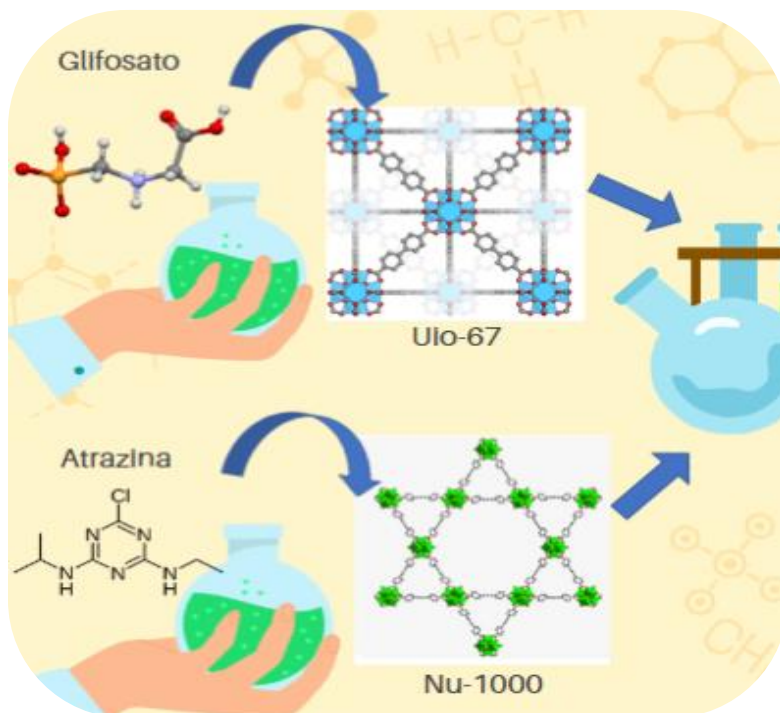
## Remoción de herbicidas

Uno de los primeros estudios de los enrejados metal-orgánicos como adsorbentes de agroquímicos fue la remoción de glifosato. El glifosato ( $C_3H_8NO_5P$ ) es un compuesto organofosforado (Fig. 3), y es el principal compuesto activo no selectivo en los herbicidas. Este compuesto tiene alta solubilidad ( $12\text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  a  $25\text{ }^\circ\text{C}$ ), por lo tanto, se distribuye fácilmente en aguas superficiales y el suelo. Los compuestos organofosforados son altamente nocivos, cancerígenos, pueden causar parálisis nerviosa y hasta la muerte, en caso de ser ingeridos. Por tal motivo, es apremiante su remoción de disoluciones para evitar que lleguen a fuentes de agua potable.



La aplicación de enrejados metal-orgánicos como adsorbentes de herbicidas se ha reportado para remover glifosato usando un material a base de circonio; posteriormente varios enrejados metal-orgánicos se han sumado a estos esfuerzos. La atrazina es otro herbicida de interés para su eliminación en disoluciones. Hasta la fecha, el mejor adsorbente de esta familia para remover atrazina es el material nombrado NU-1000 (Fig. 3), logrando una eliminación de hasta 93% (con una concentración de 10 partes por millón) en 5 min.

Estos resultados sugieren que, si bien la porosidad del material es importante, también influye la naturaleza química del contaminante, porque para lograr la remoción por adsorción o encapsulamiento debe haber compatibilidad química entre el enrejado metal-orgánicos y la molécula de interés. Por este motivo aún se siguen diseñando materiales enrejados metal-orgánicos o bien su funcionalización para mejorar su rendimiento en tecnologías de adsorción y separación, y contribuir a determinadas aplicaciones en la problemática de remediación ambiental.



**Figura 3.** Ejemplos de herbicidas removidos de disolución usando enrejados metal-orgánicos.



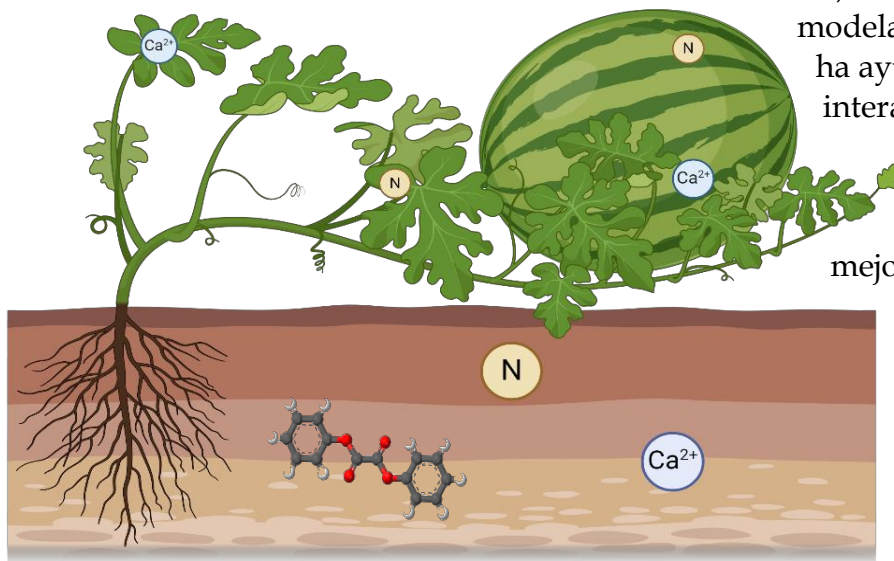
La interacción entre los enrejados MOFs y la molécula huésped no solo ha permitido remover herbicidas en disolución, sino que además ha logrado la liberación lenta y controlada de los agroquímicos, como la urea, un fertilizante a base de nitrógeno. La dosificación y transportación de fertilizantes utilizando enrejados metal-orgánicos como plataforma, en el año 2015, evidenciaron que un material a base de hierro (OPA-MOF) realizó la liberación de urea mediante la degradación microbiana del material funcional por los grupos oxalato en su estructura. La adsorción y la liberación controlada de agroquímicos depende de factores como el tamaño de los poros, la carga superficial, el valor o medida de acidez (pKa) del pesticida y el pH del medio. Además, se tienen que considerar factores importantes para seleccionar el material poroso, como lo es la biocompatibilidad con los cultivos. Los materiales enrejados metal-orgánicos deben poseer estabilidad térmica y química, dependiendo de sus usos en la agricultura y así evitar algún otro tipo de contaminación y la pérdida de su eficiencia.



**Una aplicación moderna de los enrejados metal-orgánicos es la administración de fertilizantes de manera controlada. Además, son una alternativa interesante por su reciclabilidad.**

Estudios posteriores han demostrado que los enrejados metal-orgánicos son materiales funcionales prometedores para una variedad de aplicaciones agrícolas. En este

contexto, el uso de técnicas de modelado molecular también ha ayudado a comprender la interacción entre los agroquímicos y los enrejados metal-orgánico, para un mejor entendimiento de las etapas de detección, eliminación o liberación progresiva, generando una investigación multidisciplinaria.





Por lo anterior, es posible apreciar que tanto la adsorción como la dosificación de agroquímicos, utilizando enrejados metal-orgánicos es un área de investigación relativamente nueva y el número de estudios continúa creciendo.

### Conclusiones

La funcionalización y diseño de materiales enrejados metal-orgánicos con biomoléculas le imparte nuevas propiedades estructurales y reactividad química, por lo que es un tema de interés y vanguardia, tanto en la academia como en la industria. Varios grupos de investigación se enfocan en desarrollar rutas sintéticas para la modificación de estos materiales usando diversas especies químicas que van desde nanopartículas metálicas hasta nanotubos de carbono, con el objetivo de optimizar sus propiedades y por ende sus aplicaciones. En este sentido, el diseño de materiales MOF biocompatibles es necesario, para aplicaciones agrícolas, la naturaleza de estos sólidos y su facilidad de recuperación en disolución permite que puedan ser reciclados y contribuyan para afrontar a la problemática ocasionada por uso de pesticidas y fertilizantes.



### Literatura recomendada

Vivar, J. y Méndez, J. (2015). La modernización agrícola en México y sus repercusiones en espacios rurales. *Antropologías del Sur* 3, 51 – 67.  
<https://doi.org/10.25074/rantros.v2i3.831>

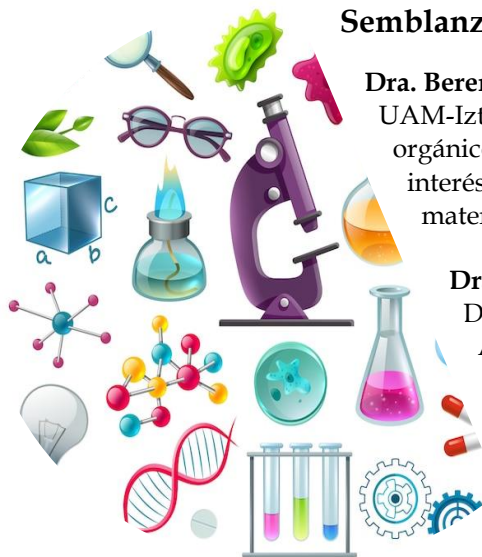
Rojas, S., Rodríguez-Diéguez, A., Horcajada, P., (2022). Metal-organic frameworks in agriculture. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 14, 15, 16983–17007.  
<https://doi.org/10.1021/acsami.2c00615>

Mahmoud, L. A. M., Reis, R. A. D., Chen, X., Ting, V. P., Nayak, S. (2022). Metal-organic frameworks as potential agents for extraction and delivery of pesticides and agrochemicals. *ACS Omega*, 7, 50, 45910–45934.  
<https://doi.org/10.1021/acsomega.2c05978>





### Semblanzas de autoras



**Dra. Berenice González Santiago.** Licenciada y Maestra en Química por la UAM-Iztapalapa. Doctorado: "Síntesis y propiedades de enrejados metal-orgánicos de escandio" en la Universidad de St. Andrews, Reino Unido. Con interés en investigación enfocada a la síntesis y funcionalización de materiales híbridos para remediación de emergencia ambiental.

**Dra. Ana Adela Lemus Santana.** Química de formación, con Maestría y Doctorado en Ciencias Químicas por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Nivel SNI II. Se especializa en Nanotecnología y materiales funcionales para la retención y reúso de CO<sub>2</sub>, energías renovables y materiales adsorbentes para filtros de gases con efecto invernadero.

Envía tus contribuciones científicas a la revista **Terra Latinoamericana**, órgano de difusión de la SOCIEDAD MEXICANA DE LA CIENCIA DEL SUELO, A. C.

**Terra Latinoamericana** es de publicación continua y publica artículos científicos originales de interés para la comunidad de la ciencia del suelo y agua.

**TERRA**  
Latinoamericana



ISSN Electrónico 2395 - 8030

<https://www.terralatinoamericana.org.mx/index.php/terra>