

# Materiales adsorbentes funcionalizados: una solución basada en química click para la purificación de agua y producción de biocombustibles

*Functionalized adsorbent materials: a click chemistry-based solution for water purification and biofuel production*

Alexis Ubaldo Salas Villalobos<sup>a</sup> y Jesse Yoe Rumbo Morales<sup>b</sup>

## RESUMEN

La creciente urbanización y el desarrollo industrial han intensificado la crisis hídrica y energética en México. La contaminación del agua y la creciente demanda de energía han puesto en evidencia la necesidad de soluciones innovadoras y sostenibles. Al permitir la modificación precisa de adsorbentes, las reacciones click facilitan la generación de materiales altamente selectivos. La combinación de la química click con tecnologías como la adsorción por oscilación de presión (PSA) ofrecen un camino prometedor para abordar de manera efectiva la contaminación del agua, reducir la dependencia de los combustibles fósiles y promover una economía circular.

**Palabras clave:** química click, adsorbentes, purificación de agua, biocombustibles, economía circular.

---

<sup>a</sup> Estudiante de la Maestría en ciencias físico matemáticas con orientación en matemáticas. Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de los Valles. Carr. a Guadalajara Supermanzana El Km. 45.5, 46708 Caimanero, Jalisco, México. Correo: alexis.salas7067@alumnos.udg.mx

<sup>b</sup> Profesor investigador de la Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de los Valles. Carr. a Guadalajara Supermanzana El Km. 45.5, 46708 Caimanero, Jalisco, México.

## **ABSTRACT**

*Increasing urbanization and industrial development have intensified the water and energy crisis in Mexico. Water pollution and increasing energy demand have highlighted the need for innovative and sustainable solutions. By enabling the precise modification of adsorbents, click reactions facilitate the generation of highly selective materials. The combination of click chemistry with technologies such as pressure swing adsorption (PSA) offer a promising avenue to effectively address water pollution, reduce dependence on fossil fuels and promote a circular economy.*

**Keywords:** *click chemistry, adsorbents, water purification, biofuels, circular economy.*

## **INTRODUCCIÓN**

La forma en que vivimos ha generado una concentración de personas en ciudades, lo que implica una mayor demanda de servicios como transporte, vivienda, energía y agua. Adicionalmente, la industria, con sus procesos productivos y la generación de residuos, se concentra cada vez más en estos mismos espacios limitados. Este desarrollo ha generado un aumento de los problemas ambientales, consecuencia directa de un modelo de consumo cada vez más demandante y poco sostenible. La crisis hídrica y la dependencia de combustibles fósiles son dos de los problemas más desafiantes que enfrenta México. La contaminación del agua no solo pone en riesgo los ecosistemas, sino que también limita la disponibilidad de agua dulce para el consumo humano y la salud pública. Paralelamente, la demanda creciente de energía y la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero impulsan la búsqueda de alternativas energéticas más limpias y sostenibles. En este contexto, las soluciones basadas en *química click* emergen como una herramienta versátil con un

enorme potencial para abordar ambas problemáticas. Al permitir la síntesis de materiales adsorbentes altamente selectivos, esta disciplina puede contribuir a la purificación del agua y a la producción eficiente de biocombustibles como el etanol, el metano y el hidrógeno. Estos avances se alinean con las metas de los Programas Nacionales Estratégicos (Pronaces) y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), que buscan garantizar el acceso a agua limpia y promover el uso de fuentes de energía renovables.

## DESARROLLO

El progreso en áreas como la agricultura, la ganadería y la industria, ha ido añadiendo complejidad a las problemáticas de la sociedad actual. Se estima que el agua residual que llega a las plantas purificadoras mexicanas presenta más de 800 tipos de contaminantes (orgánicos e inorgánicos) en el que se destacan: pesticidas, tintes tóxicos, micro plásticos, productos farmacéuticos, metales pesados y hormonas esteroides, entre otros (Aguilar-Aguilar et al., 2023). Las tecnologías disponibles actuales para la purificación de agua contemplan el uso de procesos físicos, químicos y biológicos con alto requerimiento energético y elevados costos. Cabe destacar que, la generación energética en México proviene en su mayoría de combustibles contaminantes, por lo que el aumento en su uso para tratar de solucionar esta problemática solo cambiaría el medio al que contaminamos.

Si queremos proponer soluciones realistas, que se alineen a los principios de una economía circular, es necesario observar toda la cadena de valor. La generación de energía limpia es un objetivo clave para poder solucionar el problema del agua de manera consciente. El aprovechamiento de la energía solar y eólica son por lo regular, los principales candidatos para reemplazar los generadores energéticos actuales. Sin embargo, su implementación implica la reestructuración de la maquinaria que las industrias usan actualmente (calderas, turbinas de gas, etc.) por lo que no suelen ser atractivas para el mercado actual. Una solución realista, que no implica grandes cambios en el modelo actual, es el uso de biocombustibles.

El biometano, es un gas obtenido a partir de biomasa y tiene características similares al gas natural. Puede ser inyectado directamente en la red de gas existente, lo que permitiría una transición energética menos invasiva (Catalano et al., 2024). Por su parte, el hidrógeno

puede ser producido a partir de fuentes renovables, se postula como un vector energético versátil que puede utilizarse tanto en celdas de combustible para generar electricidad como en motores de combustión interna (Senthil Rathi et al., 2024). El bioetanol, un alcohol producido a partir de la fermentación de azúcares provenientes de residuos orgánicos como el olote o el bagazo de azúcar y agave, ha emergido como una alternativa prometedora para reducir la contaminación asociada al uso de combustibles fósiles. Si bien el bioetanol de elevada pureza puede utilizarse como combustible por sí solo, su incorporación como aditivo carburante en la gasolina ha demostrado ser una estrategia eficaz para mitigar los impactos ambientales en Brasil y EE. UU. (Yaverino-Gutiérrez et al., 2024).

Entonces, la solución a estas problemáticas debe de cumplir con tres puntos importantes: ser eficiente, barato y no contaminante. Entre las tecnologías emergentes con este enfoque destaca una, la *adsorción por oscilación de presión* (PSA, por sus siglas en inglés). Este proceso se basa en el fenómeno de la fisisorción, que es la adherencia de partículas a un material poroso, conocido principalmente como adsorbente. Este método permite separar de manera selectiva elementos de mezclas de gases o líquidos, utilizando un conjunto de válvulas para realizar variaciones de presión dentro de un par (o más) de columnas (Figura 1). Así, se pueden separar elementos contaminantes en el agua que por medios comunes no sería posible, y a su vez generar biocombustibles con un elevado grado de pureza para mejorar su rendimiento.

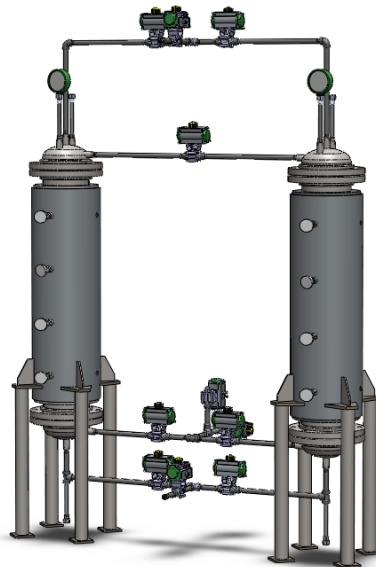


Figura 1. Ejemplo de un sistema completo de PSA.

El material adsorbente resulta de interés pues, suele ser encontrado en la naturaleza o ser aprovechado de subproductos de otros procesos. De la parte de los adsorbentes naturales se destacan dos: el carbón activado y las zeolitas. El primero, resulta de la combustión de residuos orgánicos de distintas fuentes de origen que, dependiendo de la zona geográfica, suele ser barato de producir. Las zeolitas, por su parte, son materiales de tipo rocoso provenientes de las faldas volcánicas y el subsuelo. Suelen ser descartados por la ignorancia de sus elevadas aplicaciones. Dependiendo de la zona, habrá una mayor o menor distribución de estos materiales, por lo que su precio puede variar, pero no suelen ser caros al ser usualmente desechados o utilizados como relleno en la construcción.



Figura 2. Elementos para el tratamiento químico en zeolitas.

Para que estos materiales presenten un alto grado de selectividad para retener compuestos específicos es necesario que pase por un proceso de tratamiento químico (Figura 2). Usualmente, se utilizan catalizadores químicos para que los adsorbentes presenten las características fisicoquímicas deseadas. Las reacciones click, específicamente el acoplamiento tiol-eno (Kehr et al., 2011) y la cicloadición de azidas y alquinos (Aflak et al., 2022), han demostrado ser de gran utilidad para la mejora de zeolitas (Clerc et al., 2020) y carbones activados (Nikita et al., 2020). Estas modificaciones a nivel molecular pueden otorgar a estos materiales nuevas propiedades, tales como mayor selectividad, estabilidad térmica y química, y una mayor capacidad de adsorción. Al funcionalizar estos materiales por medio de reacciones click, se puede modular la afinidad de los sitios activos hacia los componentes de la mezcla gaseosa, optimizando así el proceso de separación. Es precisamente en este escenario donde se vislumbra un gran potencial para mejorar el rendimiento de procesos como el PSA.

## CONCLUSIONES

La demanda de agua potable, el tratamiento de aguas residuales y la generación de energía eléctrica en áreas urbanas sobrecargadas ponen a prueba la infraestructura existente en México. Es necesario innovar en la búsqueda de soluciones integrales que aborden las causas de estas problemáticas y que generen impactos positivos a largo plazo. En este contexto, la combinación de la química click con enfoques multidisciplinarios surge como una estrategia prometedora para implementar tecnologías innovadoras y eficientes como la PSA. La capacidad de generar enlaces químicos de manera rápida y selectiva ofrece un amplio abanico de posibilidades para la mejora de adsorbentes naturales como la zeolita o el carbón activado. Al unir estos materiales con la ingeniería, la biología, la física y otras disciplinas, se pueden abordar los desafíos relacionados con el agua y la generación de combustible desde una perspectiva más consciente y colaborativa, facilitando el desarrollo de soluciones sostenibles.

## REFERENCIAS

- Aflak, N., El Mouchtari, E. M., Ben El Ayouchia, H., Anane, H., Rafqah, S., Julve, M., & Stiriba, S. E. (2022). Copper-on-Magnetically Activated Carbon-Catalyzed Azide-Alkyne Click Cycloaddition in Water. *Catalysts*, *12*(10), 1244. <https://doi.org/10.3390/CATAL12101244/S1>
- Aguilar-Aguilar, A., de León-Martínez, L. D., Forgiionny, A., Acelas Soto, N. Y., Mendoza, S. R., & Zárate-Guzmán, A. I. (2023). A systematic review on the current situation of emerging pollutants in Mexico: A perspective on policies, regulation, detection, and elimination in water and wastewater. *Science of The Total Environment*, *905*, 167426. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2023.167426>
- Catalano, G., D'Adamo, I., Gastaldi, M., Nizami, A. S., & Ribichini, M. (2024). Incentive policies in biomethane production toward circular economy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *202*, 114710. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2024.114710>
- Clerc, A., Bénéteau, V., Pale, P., & Chassaing, S. (2020). Chan-Lam-type Azidation and One-Pot CuAAC under CuI-Zeolite Catalysis. *ChemCatChem*, *12*(7), 2060–2065. <https://doi.org/10.1002/CCTC.201902058>
- Kehr, N. S., El-Gindi, J., Galla, H. J., & De Cola, L. (2011). Click chemistry on self-assembled monolayer of zeolite L crystals by microcontact printing – Applications in nanobiotechnology. *Microporous and Mesoporous Materials*, *144*(1–3), 9–14. <https://doi.org/10.1016/J.MICROMESO.2010.11.030>
- Nikita, K., Ray, D., Aswal, V. K., & Murthy, C. N. (2020). Surface modification of functionalized multiwalled carbon nanotubes containing mixed matrix membrane using click chemistry. *Journal of Membrane Science*, *596*, 117710. <https://doi.org/10.1016/J.MEMSCI.2019.117710>
- Senthil Rathi, B., Senthil Kumar, P., Rangasamy, G., & Rajendran, S. (2024). A critical review on Biohydrogen generation from biomass. *International Journal of Hydrogen Energy*, *52*, 115–138. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2022.10.182>
- Yaverino-Gutiérrez, M. A., Wong, A. Y. C. H., Ibarra-Muñoz, L. A., Chávez, A. C. F., Sosa-Martínez, J. D., Tagle-Pedroza, A. S., Hernández-Beltran, J. U., Sánchez-Muñoz, S.,

Santos, J. C. dos, da Silva, S. S., & Balagurusamy, N. (2024). Perspectives and Progress in Bioethanol Processing and Social Economic Impacts. *Sustainability 2024, Vol. 16, Page 608, 16(2)*, 608. <https://doi.org/10.3390/SU16020608>