

# La adsorción como método de separación para la remoción de contaminantes disueltos en el agua

Anahí González López, José Alberto Galicia Aguilar\* , Maribel López Badillo

Facultad de Ingeniería Química, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Ubicación: Ciudad Universitaria, Avenida San Claudio y Boulevard 18 Sur, Col. Jardines de San Manuel, 72570 Heroica Puebla de Zaragoza, Puebla, México

[jose.galicia@correo.buap.mx](mailto:jose.galicia@correo.buap.mx)

## Palabras clave

Procesos de separación, adsorción, contaminantes orgánicos, absorbentes poliméricos.

*“Con el incremento de la población, de los procesos de producción y de generación de contaminantes es necesario que los procesos de separación sean más efectivos en el tratamiento de uno de los recursos más importantes para la vida: el agua”*

## 1. Introducción

Los procesos de separación son las operaciones que se llevan a cabo para dividir los componentes de una mezcla en sus constituyentes, resultando en la obtención de componentes puros o de fases que tienen características similares entre sí [1]. Estos procesos se han empleado desde las primeras civilizaciones para la generación de productos de uso o de consumo, por ejemplo, en la extracción de fragancias de las flores (para ser utilizados como perfume) o la obtención mediante arrastre de vapor de aceites de diferentes semillas o plantas [2] como el

maíz, la canola, la palma, las semillas de girasol, la semilla del aguacate, etc. El café soluble es obtenido mediante la sublimación al vacío de una mezcla café-agua, en una operación llamada liofilización, o a través de secado por aspersión, donde la mezcla café-agua se atomiza para evaporar el agua. Al retirar el agua del café, se incrementa el tiempo de anaquel, es decir, el tiempo de conservación del producto cerrado sin necesidad de añadir conservadores. Estos breves ejemplos muestran la importancia de los procesos de separación en la vida diaria y la variedad de estos. Los eventos fortuitos y el conocimiento empírico han dado lugar al desarrollo de los procesos de separación, los cuales actualmente se realizan basados en el conocimiento científico.

Los procesos de separación se escogen para resolver las necesidades de purificación de materias primas o productos en la industria química, de alimentos, de gestión ambiental, entre otras. Uno de los temas más importantes de la

gestión ambiental es la descontaminación del agua. De manera inevitable, en las actividades cotidianas se mezclan compuestos en corrientes acuosas. El origen de esos compuestos se debe a factores como los medicamentos no metabolizados por los seres humanos; el uso de productos de aseo personal o de limpieza; los residuos de los procesos en la industria, como el lavado de textiles, la elaboración de productos cárnicos, la desinfección de materiales de uso hospitalario, entre otros. Remover los solutos (compuestos que se encuentran disueltos en el agua) de los diferentes efluentes acuosos requiere de procesos acorde a sus características químicas y la concentración a la que se encuentran presentes. Algunos de estos procesos necesitan grandes cantidades de energía o de prolongados tiempos de procesamiento, por ejemplo, en las lagunas de aireación se requiere de un extenso tiempo de estancamiento para que la tierra filtre los solutos, sin embargo, esto genera contaminación en el suelo. Ante ello, el uso de métodos de separación de bajo impacto ambiental no es solo una tendencia, sino una necesidad para resolver los problemas de contaminación del agua.

El tratamiento de aguas residuales consta de diferentes etapas, en las primeras dos se remueven materiales sólidos, arenas, aceites, materia orgánica y se lleva a cabo la desinfección del agua [3]. Posteriormente, en la etapa terciaria, la atención se centra en la remoción o eliminación de compuestos que se encuentran disueltos en ella, tal es el caso del fenol, el cual es utilizado en la industria textil, farmacéutica y petroquímica. Los compuestos fenólicos en el agua tienen una alta toxicidad y su acumulación en los seres humanos puede producir daño al hígado, irritación cutánea o carcinogénesis [4]. Otro tipo de solutos orgánicos disueltos en el agua son los llamados contaminantes emergentes, los cuales derivan de la activi-

dad antropogénica y tienen la característica de ser poco biodegradables, tóxicos y altamente persistentes en medios acuosos a pesar de encontrarse a bajas concentraciones. Hasta 2016 se identificaron 1036 sustancias bajo esta clasificación, incluyendo antiespumantes, surfactantes, plaguicidas, fármacos, entre otros [5]. Cabe mencionar que la normativa sobre el tratamiento del agua no contempla la remoción de contaminantes emergentes, es decir, los procesos de separación empleados actualmente no están diseñados para hacer frente a esta problemática, dando como resultado la escasa o nula reducción de concentración de estos compuestos en el agua. En este sentido, diversas investigaciones se han enfocado en evaluar tanto procesos de separación como materiales que permitan aminorar la presencia de los contaminantes emergentes en medios acuosos, tal es el caso de la coagulación-floculación, la microfiltración, uso de membranas poliméricas o la adsorción [6], siendo esta última un método efectivo, flexible y de bajo costo.



Fig. 1. Etapas de tratamiento del agua.

## 2. ¿Qué es la adsorción?

La adsorción es un fenómeno de superficie en el que átomos o iones de un gas o un líquido (adsorbato) se difunden en la superficie de un material sólido poroso (adsorbente).

La adsorción puede clasificarse como adsorción física (también conocida como fisisorción) si las interacciones predominantes entre el adsorba-

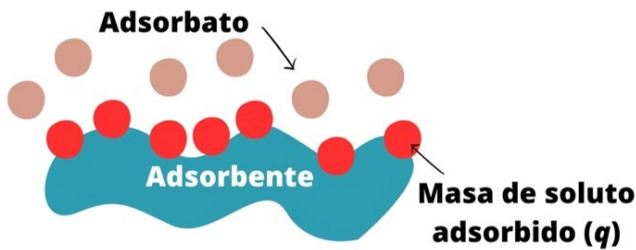


Fig. 2. Esquema de adsorción.

to y el adsorbente son fuerzas intermoleculares de baja energía, tipo Van der Waals o tipo puente de hidrógeno. Las moléculas fisisorbidas no pierden su identidad química, es decir, no se forman nuevos compuestos por la interacción entre el adsorbato y el adsorbente. Asimismo, gracias a esa baja energía de interacción es posible retirar (desorber) del adsorbente el soluto removido, permitiendo así la reutilización del material.

Por otro lado, la quimisorción, también conocida como adsorción activada, se caracteriza por la firme adhesión de moléculas en la superficie del adsorbente debido a la formación de enlaces covalentes o iónicos fuertes que ocasionan frecuentemente que el proceso sea irreversible y en donde la molécula original puede sufrir cambios químicos.

En la adsorción, el adsorbente es el corazón del proceso, por lo que un adsorbente debe tener alta área superficial, alta selectividad, alta capacidad de adsorción para minimizar la cantidad de material empleado, estabilidad térmica y química, dureza y fuerza mecánica para aminorar el desgaste físico del adsorbente, baja o nula solubilidad con el fluido en contacto, facilidad de manejo, capacidad de regeneración y bajo costo [2].

Existen diferentes materiales adsorbentes que se clasifican de acuerdo con su naturaleza, por ejemplo, los adsorbentes de origen natural

como las arcillas, las zeolitas y los materiales silíceos; los bioadsorbentes como el quitosano y el alginato; adsorbentes carbonáceos como el carbón activado y los adsorbentes sintéticos como los polímeros, principalmente [7]. A pesar de que el carbón activado es el adsorbente más conocido y el comúnmente utilizado, presenta algunas desventajas en el proceso de activación/reactivación. En la activación química el material se impregna de ácido fosfórico, hidróxido de potasio, cloruro de zinc o tiocianato potásico, lo que representa la generación de desechos químicos. En la activación térmica el material se somete a temperaturas superiores a los 800 °C, ocasionando una alta demanda energética [8].

Por otra parte, los adsorbentes poliméricos han sido objeto de estudio debido a las ventajas que presentan, las cuales están relacionadas con la flexibilidad de formulación y la facilidad de regeneración del material.

### 3. Adsorbentes poliméricos

Los adsorbentes poliméricos se obtienen a partir de procesos de polimerización, los cuales tienen como objetivo la formación de macromoléculas conocidas como polímeros y cuya estructura consiste en una cadena compuesta por la repetición de una o varias moléculas (monómeros) de forma consecutiva, ya sea que se encuentren ordenadas o dispuestas aleatoriamente. Los polímeros se clasifican como homopolímeros si la unidad de repetición es la misma y como copolímeros si existe la presencia de dos o más unidades repetidas [9].

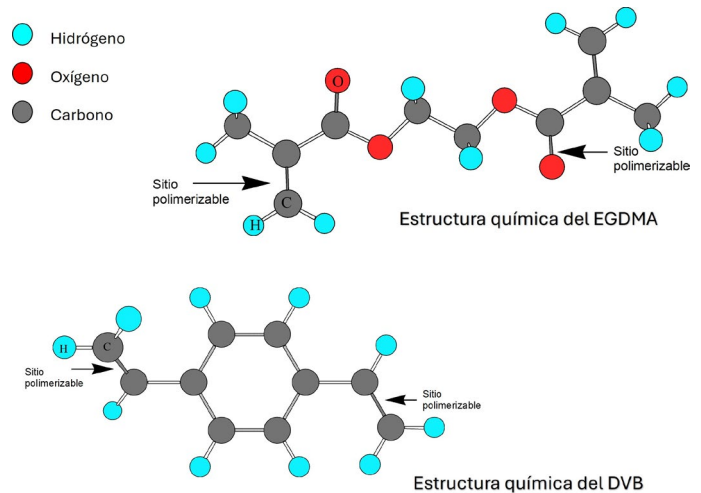
Para la formación de adsorbentes poliméricos hay dos factores importantes a considerar: el método de polimerización y las propiedades de los reactivos. El método de polimerización se elige de acuerdo con las características esperadas en el producto final. En este caso,

para que los polímeros sean manejables como materiales adsorbentes se prefiere contar con una geometría esférica, misma que puede ser obtenida a partir de la polimerización en suspensión. Esta metodología incorpora una fase acuosa y una fase orgánica, que se homogenizan mediante el uso de un surfactante, el cual cumple la función de integrar ambas fases. La mezcla homogenizada puede ser polimerizada incrementando la temperatura del medio de reacción o mediante la adición de un catalizador (elemento que acelera una reacción).

Adicionalmente, los adsorbentes poliméricos deben ser sólidos e insolubles, para ello se hace uso de agentes reticulantes. Un agente reticulante es una molécula capaz de unir dos o más cadenas poliméricas, formando redes moleculares tridimensionales. Si los enlaces formados entre las cadenas de polímeros y el agente reticulante son de naturaleza química, estos no pueden deshacerse y confieren características particulares como la retención de agua o de solutos físicamente sobre su superficie.

Cabe mencionar que los polímeros reticulados pueden incrementar su área específica de superficie mediante la variación de la cantidad de agente reticulante usada en la formulación del material. Algunos de los reticulantes más utilizados son el etilenglicol dimetacrilato (EGDMA) o el divinilbenceno (DVB), los cuales confieren resistencia química, dureza, adhesión y flexibilidad a los polímeros.

Por otro lado, en la formulación de los adsorbentes poliméricos se pueden añadir grupos funcionales, como los grupos carbonilo, metilo, nitrilo, amino, etc., que promuevan la afinidad de los adsorbentes con el soluto que se espera remover [10]. El acrilonitrilo es un ejemplo de monómero funcional y se incorpora en el adsorbente para incrementar la



**Fig. 3.** Estructura química de los agentes reticulantes más utilizados en la polimerización.

polaridad debido a la presencia de los grupos nitrilo ( $-C=N$ ), haciendo al polímero afín a solutos polares. La polaridad es la distribución no uniforme de cargas eléctricas en la superficie de las moléculas, es decir, es cuando una molécula tiene un lado "más positivo" y otro lado "más negativo"; este último es en donde se encuentra la mayor parte de los electrones. En conclusión, el polímero polar puede atraer moléculas polares.

#### 4. Aplicación de adsorbentes poliméricos

Mundialmente se realizan investigaciones de adsorción de solutos en agua empleando adsorbentes poliméricos no comerciales, los cuales son formulados con base en necesidades específicas de selectividad o afinidad con determinado adsorbato. Tales investigaciones tienen la finalidad de evaluar el desempeño, capacidad de regeneración y versatilidad de los adsorbentes poliméricos, para ello, es indispensable establecer la cantidad de adsorbente necesario para tratar un determinado volumen de agua, intervalos de concentración de los solutos, tiempo de contacto del adsorbente con la solución acuosa o la temperatura del medio acuoso.

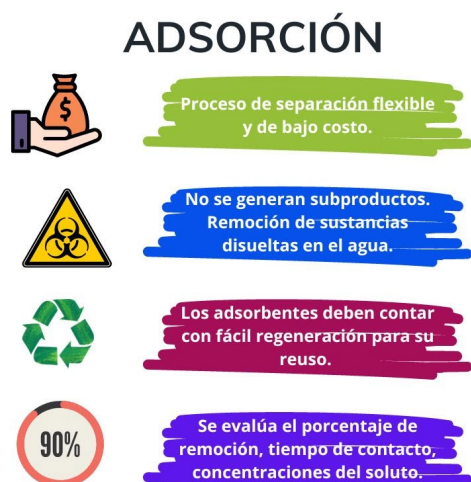


Fig. 4. La adsorción como método de separación para la remoción de contaminantes orgánicos disueltos en agua.

Por ejemplo, en Sudáfrica (2016) se estudió la adsorción de contaminantes emergentes de origen farmacéutico como naproxeno, diclofenaco e ibuprofeno disueltos en agua empleando un adsorbente polimérico a base de EGDMA y sin la inclusión de un monómero funcional. Una de las ventajas más representativas de esta investigación es el corto tiempo de contacto necesario para remover los solutos de interés, siendo este de 10 minutos para concentraciones alrededor de 50 ppm (partes por millón). La capacidad de adsorción del material es de 4.819 mg de adsorbato por cada gramo de adsorbente [11].

En México, desde 2016, se estudia la aplicación de polímeros adsorbentes reticulados con EGDMA y funcionalizados con acrilonitrilo (AN) para promover el carácter polar del adsorbente. Estos polímeros se han puesto a prueba en la adsorción de fenol en agua en concentraciones de 150 a 1000 ppm. Cabe mencionar que, incluso a altas concentraciones, se logra una alta adsorción a los 20 minutos de contacto del material con el medio acuoso. Adicionalmente, la capacidad de adsorción del material funcionalizado es de 11.9 mg de adsorbato por cada gramo de adsorbente. Otra de las ventajas que

presenta este material es la facilidad con la que el adsorbente utilizado puede ser lavado para su reuso, para ello, el polímero se sumerge en agua a 50 °C y se mantiene en agitación para desorber el soluto, esto representa un beneficio operativo dado que la regeneración no conlleva una alta demanda energética y se evita el uso de otras sustancias químicas que pueden ser aún más contaminantes [12]. Estos mismos polímeros adsorbentes se encuentran en estudio para la remoción de diclofenaco y ácido acetilsalicílico, considerando que ambos fármacos son moléculas polares.

## 5. Conclusiones

Los procesos de separación tienen aplicación en diferentes sectores, como la industria química, cosmética, farmacéutica, alimentaria, así como en la gestión ambiental. La purificación del agua es indispensable para el consumo humano; el riego de los sembradíos; como materia prima en los procesos industriales, entre muchos otros. Por ello, los procesos de separación empleados particularmente en el tratamiento terciario del agua deben ser eficientes ante la presencia de sustancias contaminantes que ponen en riesgo la salud humana y los ecosistemas. La adsorción es un método altamente empleado para la remoción de sustancias disueltas en el agua debido a sus ventajas operativas. Por ello, se busca que los adsorbentes cuenten con facilidad de uso y regeneración, así como una amplia capacidad para retener los contaminantes en su superficie.

Hay una gran cantidad de variaciones de formulación para los adsorbentes poliméricos, con el objetivo de hacerlos afines a ciertos solutos y de mejorar su capacidad de adsorción. Aún hay camino por recorrer en estas investigaciones, sobre todo ante la detección de nuevos contaminantes que antes no se tenían contemplados en los procesos de purificación del agua. A

pesar de ello, los adsorbentes poliméricos han demostrado su capacidad para ser considerados en los procesos de separación previo a la descarga de efluentes en las aguas residuales, y complementarios para la adsorción fina, posterior al tratamiento tradicional del agua.

## Agradecimientos

A la Vicerrectoría de Investigación y Estudios de Posgrado de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, por el financiamiento a través del proyecto VIEP-2022-00096.

## Referencias

- [1] Judson-King, C. *Separation Processes* (2.<sup>a</sup> ed.) Dover Publications Inc., United States of America, 2013. ISBN: 9780486491738.
- [2] Muñoz, A., & Garritz, A. Mujeres y química Parte I.: De la antigüedad al siglo XVII. *Educación química*, 24(1) (2013), 2-7. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0187-893X2013000100001&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-893X2013000100001&lng=es&tlng=es)
- [3] Garg, S., *Industrial Wastewater: Characteristics, Treatment Techniques and Reclamation of Water*. *Environmental science and engineering*, (2021), 1-23. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-83811-9\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-83811-9_1)
- [4] Cao, Y., Wang, Y., Zhou, F., Huang, J., & Xu, M. Acrylamino-functionalized hyper-cross-linked polymers for efficient adsorption removal of phenol in aqueous solution. *Separation and Purification Technology*, 303 (2022), 122229. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.122229>
- [5] Meléndez-Marmolejo J., García-Saavedra Y., Galván-Romero V., Díaz de León-Martínez L., Vargas-Berrones K., Mejía-Saavedra J., Flores-Ramírez R. Contaminantes emergentes. Problemática ambiental asociada al uso de antibióticos. Nuevas técnicas de detección, remediación y perspectivas de legislación. *América Latina. Rev. Salud Ambient.*, 20(1) (2020), 53-61.
- [6] Qieyuan Gao, Pengrui Jin, Lei Wang, Yaowen Xing, Xiahui Gui, Peter Van Puyvelde, Bart Van der Bruggen. Removal of organic pollutants in coking wastewater based on coal-based adsorbents: A pilot-scale study of static adsorption and flotation, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9 (2021), 106844, ISSN 2213-3437.
- [7] Mahmood, T., Momin, S., Ali, R., Naeem, A., & Khan, A. Technologies for Removal of Emerging Contaminants. *Wastewater*. IntechOpen, (2022). doi: 10.5772/intechopen.104466
- [8] Heidarinejad, Z., Dehghani, M., Heidari, M., Javedan, G., Ali, I., Sillanpää, M. Methods for preparation and activation of activated carbon: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 18 (2020), 393–415. <https://doi.org/10.1007/s10311-019-00955-0>
- [9] Ebewele, R. O. *Polymer Science and Technology*. CRC Press, Florida, 2000. ISBN 0-8493-8939-9
- [10] Martinelli, M., Froimowicz, P., Calderón, M., & Strumia, M. *Materiales poliméricos funcionalizados. Parte I: Síntesis*

y polimerización de monómeros funcionalizados. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 4(4) (2003), 30-47. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7870241>

[11] Madikizela, L. M., & Chimuka, L. Synthesis, adsorption and selectivity studies of a polymer imprinted with naproxen, ibuprofen and diclofenac. *Journal Of Environmental Chemical Engineering*, 4(4) (2016), 4029-4037. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2016.09.012>

[12] Galicia, J., Santamaría, J., López, M., Sánchez, M., & Varela, J. Synthesis and characterization of AN/EGDMA-based adsorbents for phenol adsorption. *React. Funct. Polym.*, 117 (2017), 112–119. <http://dx.doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2017.06.007>