

NANOCOMPUESTOS POLIMÉRICOS CON NANOPARTÍCULAS CERÁMICAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA

POLYMERIC NANOCOMPOSITES WITH CERAMIC NANOPARTICLES
FOR WATER TREATMENT

MARLENE LARIZA ANDRADE
GUEL¹

GREGORIO CÁRDENAS
PLIEGO¹

DIEGO MARTÍNEZ
CARRILLO³

CHRISTIAN JAVIER CABELLO
ALVARADO^{1,2}

MARISSA PÉREZ ÁLVAREZ¹

1. Centro de Investigación en
Química Aplicada, Saltillo,
Coah.

2. CONAHCYT-CIQA,
Saltillo, Coahuila.

3. Centro de Investigación en
Geociencias Aplicadas,
Unidad Norte, UAdeC.

Correspondencia
gregorio.cardenas@ciqa.edu.mx
ORCID: 0000-0002-2692-4995

Recepción de artículo
24 de octubre de 2024

Artículo aceptado
14 de noviembre de 2024.

RESUMEN

La escasez de agua es una realidad que afecta principalmente a las regiones del norte y centro de México. Una alternativa es el tratamiento del agua dulce contaminada para así abastecer las necesidades diarias del consumo industrial y doméstico. Debido a esto, se requiere de la búsqueda de nuevos materiales adsorbentes selectivos, con mayor capacidad de remoción de contaminantes orgánicos e inorgánicos. Los nanocompuestos poliméricos sintéticos o naturales poseen propiedades únicas como adsorbentes de contaminantes. En este trabajo se resumen las principales investigaciones acerca de los nanocompuestos poliméricos con aplicación para el tratamiento de agua.

Palabras clave: nanocompuestos; nanopartículas cerámicas; agua; tratamiento.

ABSTRACT

Water scarcity is a reality that mainly affects the northern and central regions of Mexico. An alternative is the decontamination of fresh water to supply the daily needs of industrial and domestic consumption. Due to this, the search for new selective adsorbent materials is required, with greater capacity to remove organic and inorganic contaminants. Synthetic or natural polymeric nanocomposites have unique properties as contaminant adsorbents. This work summarizes the main research on polymeric nanocomposites with application for water treatment.

Keywords: nanocomposites; ceramic nanoparticle; water; treatment.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años ha crecido la demanda de agua potable, no obstante, las fuentes de agua dulce no logran abastecer esta demanda ocasionado un estrés hídrico en el mundo. El 25% de la población en el mundo tiene que hacer frente, cada año, a condiciones de estrés hídrico de carácter extremadamente alto; se prevé que para el 2050 más del sesenta por ciento de la población enfrentará un mes al año el estrés hídrico (World Resoruce Institute, 2023).

Los países en América Latina con más estrés hídrico son Chile y México. Nuestro país cuenta con regiones semidesérticas y es vulnerable a sequías que han ido aumentando en frecuencia y duración, lo que ocasiona una crisis de agua debido a una mayor demanda para consumo doméstico, industrial, ganadero y agrícola. Aunque se cuenta con agua dulce proveniente en ríos, lagos y arroyos, la mayoría se encuentra contaminada por compuestos orgánicos como colorantes, pesticidas, herbicidas, medicamentos, entre otros y compuestos inorgánicos principalmente metales pesados provenientes de industrias (Ávila y col., 2021). Una manera de abordar este problema es ayudar a reducir y/o eliminar la contaminación de las fuentes de agua dulce en México. Existen diferentes métodos para la descontaminación del agua, los más comunes son los físicos (filtración, precipitación, tamizado, separación), químicos (cloro, coagulación, procesos electroquímicos, oxidación, intercambio de iones) y biológicos (a base de microorganismos) (Andrade y col., 2023). Uno de los métodos que ha atraído especial atención es la adsorción, debido a que es un método sencillo y eficaz para la remoción de contaminantes (Sotelo y col., 2013). Así se han reportado diferentes materiales adsorbentes como estructuras carbonosas, zeolitas, óxidos e hidróxidos de metales, compuestos y nanocompuestos poliméricos (Acuña y col., 2016).

Los nanocompuestos poliméricos se destacan en su implementación como material adsorbente, específicamente las membranas son de gran interés debido a que logran la separación de contaminantes y retienen selectivamente compuestos, diversas investigaciones se han



enfocado en optimizar la selectividad de éstas y mejorar la resistencia química y mecánica.

Por otra parte, el desarrollo de nuevos nanocompuestos a base de polímeros sintéticos y naturales adicionando nanopartículas (NPs) cerámicas ofrece un campo de innovación y una alternativa para el tratamiento de agua. En este trabajo se recopilan los principales estudios de nanocompuestos poliméricos tanto sintéticos como naturales, y su aplicación en el tratamiento de agua.

NANOCOMPUESTOS POLIMÉRICOS SINTÉTICOS

La filtración por membranas poliméricas es una tecnología viable para eliminar selectivamente los contaminantes mediante poros, y pueden clasificarse en microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración, esta última se dirige a la eliminación de metales pesados, dureza y compuestos orgánicos. Las membranas poliméricas poseen una fisicoquímica compleja que dependiendo de las propiedades fisicoquímicas como: hidrofóbica, hidrofílica, resistencia mecánica, resistencia a la temperatura y las condiciones de operación entre ellas la concentración de alimentación y gradiente de presión a través de la membrana; es su eficiencia en la separación de compuestos y adsorción (Hyder y col., 2006). En la Figura 1. se presenta un esquema de la membrana polimérica, primero se alimenta con la solución que requiere separarse, después ocurre el proceso de difusión el cual en ocasiones se le añade energía cuando se trata de membranas de intercambio iónico y por último ocurre el permeado.

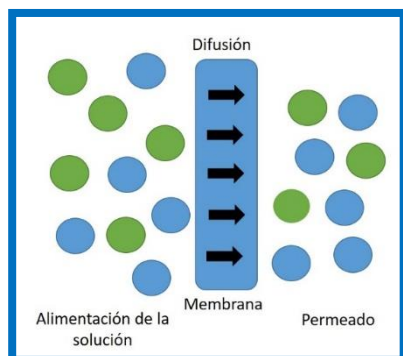


Figura 1. Esquema de una membrana polimérica.

Se han preparado membranas com-puestas de poliétersulfona con nanopartículas (NPs) de óxido de zinc (ZnO) las cuales son irradiadas con radiación ultravioleta (UV) para desinfección de agua, además, se ha reportado la incorporación de NPs de óxido de zirconio (ZrO_2) que son más estables químicamente, y por lo tanto más adecuadas para la filtración en situaciones desfavorables, como por ejemplo en el filtrado de aguas residuales con presencia de bacterias y contaminantes ácidos o básicos. La membrana de poliétersulfona con NPs ZrO_2 presenta una permeabilidad al agua veinte veces mayor en comparación a la membrana de poliétersulfona sin nanopartículas (Wen y col., 2019).

Las membranas de difluoruro de polivinilideno y poli (amida-imida) combinadas con TiO_2 presentan propiedades fotocatalíticas, la presencia de TiO_2 mejora la resistencia a la temperatura y la permeabilidad de la membrana. Las nanopartículas de TiO_2 son ampliamente usadas en el tratamiento de agua porque además de la eliminación de compuestos orgánicos, es posible la eliminación de bacterias contaminantes como *E. coli* (Agboola y col., 2021). Rahimpour y colaboradores (2008) estudiaron el efecto de la radiación de UV sobre membranas de poliétersulfona/ TiO_2 y realizaron tratamientos con y sin radiación, las membranas irradiadas con UV tienen un mayor flujo y mayor resistencia a la suciedad en comparación con la membrana sin radiación (Rahimpour y col., 2008). La membrana de poliétersulfona/ TiO_2 presenta buena permeabilidad con actividad antibacteriana atribuida a la radiación de UV sobre el TiO_2 que genera especies reactivas (ROS) para un efecto bactericida. Además, se han estudiado, membranas de poliétersulfona, polipropileno, fluoruro de polivinilideno incorporando nanopartículas de TiO_2 , las membranas son irradiadas con una lámpara de radiación UV para activar la propiedad de fotocatálisis que produce actividad antibacteriana, autolimpieza y capacidad de descomposición de compuestos orgánicos, esto ayudaría a la remoción de contaminantes tipo orgánico como colorantes, antibióticos, herbicidas, plaguicidas entre otros (Yin y col., 2015).

El ZnO es otra nanopartícula cerámica que puede adsorber la luz en la longitud de onda de 350 a 450 nm. Se ha reportado la eficiencia del



nanocompuesto de ZnO con fluoruro de polivinilideno a diferentes concentraciones de 0.5, 1.5 y 3.0 % (Wen y col., 2019). Asimismo, se ha estudiado el nanocompuesto de polimetilmetacrilato (PMMA) con nanopartículas de ZnO para la degradación de azul de metileno y fenol con la radiación UV, la preparación de este nanocompuesto se realizó mediante sonificación en solución (Di Mauro y col., 2017).

Saeed y col. (2021) prepararon películas de nylon 6,6 y nanocompuestos de nylon 6,6/ZnO mediante el método mezclado en solución donde el polímero se pone en contacto con un solvente en agitación y las nanopartículas se dispersan también en un solvente, afín ambas soluciones se mezclan en agitación y se secan para formar películas, estas se utilizaron para la fotodegradación del tinte rojo, obteniéndose un 58.3 % de remoción; para esta degradación se utilizaron 5 h de irradiación de UV, además se observó que disminuyeron las propiedades mecánicas debido a la aglomeración de las nanopartículas (Saeed y col 2021).

Por otra parte, los nanocompuestos con una matriz polimérica y arcilla se pueden clasificar en tres grandes grupos: microcompuestos de fases separadas, nanocompuestos intercalados y nanocompuestos exfoliados. Algunos polímeros utilizados son poliésteres como el tereftalato de polietileno, polipropileno y poliestireno. Los contaminantes orgánicos removidos mediante adsorción por estos nanocompuestos lo pueden realizar mediante diferentes mecanismos como interacciones electrostáticas y mecanismos de quimisorción para la adsorción eficiente de los contaminantes (Mukhopadhyay y col., 2020).

En la Tabla 1 se resumen algunos nanocompuestos poliméricos sintéticos que contienen nanopartículas cerámicas con aplicaciones en el tratamiento de agua a partir del método de adsorción de contaminantes orgánicos e inorgánicos.



Tabla 1. Nanocompuestos poliméricos sintéticos para el tratamiento de agua.

Matriz polimérica	Nano-partículas	Aplicación	Referencia
Nylon 6	ZnO	Adsorción de azul de metileno	(Andrade y col., 2021)
Poliamida	SiO ₂	Adsorción de azul de metileno	(Osman y col., 2020)
Poliamida	ZnO	Remoción de Cr (VI)	(Dinari y col., 2018)
Poliétersulfona	ZnO	Adsorción de pesticida organofosfatado (diazinon)	(Mahmoodi y col., 2022)
Estireno	SiO ₂	Adsorción de Remazol Azul Brillante R	(Guerriore y col., 2020)
Polietilenglicol/ polianilina	ZnO-Ag	Adsorción de verde brillante	(Gouthaman y col., 2019)
Poliacrilamida	TiO ₂	Adsorción de cristal violeta	(Raj y col., 2018)
Polipirrol	TiO ₂	Adsorción de naranja de metilo	(Wang y col., 2008)

NANOCOMPUESTOS POLIMÉRICOS NATURALES

El quitosano es un biopolímero que se obtiene de la reacción en medio básico de la quitina. La quitina se extrae principalmente de los exoesqueletos de artrópodos como cangrejos, camarones, langostas y moluscos (Romero y col., 2020). La preparación de nanocompuestos de quitosano con Fe₃O₄-Al₂O₃ se ha utilizado para la eliminación de aniones de fosfato y nitrato en un tiempo de 60 min. Estos nanocompuestos presentaron una mayor área superficial con cierta porosidad que son sitios activos para la adsorción. También se han probado nanocompuestos de quitosano--Fe₃O₄-ZrO₂ encontraron una menor capacidad de adsorción de los aniones de fosfato y nitrato. La adición de nanopartículas juega un papel importante para mejorar la estabilidad química, adsorción y propiedades mecánicas del nanocompuesto (Khodakarami y col., 2021). En la Tabla 2 se presentan algunos trabajos reportados acerca de nanocompuestos poliméricos naturales para la adsorción de compuestos orgánicos e inorgánicos.



Tabla 2. Nanocompuestos poliméricos naturales para el tratamiento de agua.

Matriz polimérica	Nano-partículas	Aplicación	Referencia
PLA	Nanoarcillas closite 20 A	Adsorción de azul de metileno	(Andrade y col., 2021)
PLA	ZnO-TiO ₂	Adsorción de azul de metileno	(Andrade y col., 2022)
Almidón	ZnO	Adsorción de plomo	(Naushad y col., 2021)
PVA-polivinilbutiral	MnO	Adsorción de plomo, cadmio, cobre	(Azad y col., 2021)
PVA	TiO ₂	Remoción de una mezcla de azul de metileno y naranja de metilo	(Jaseela y col., 2019)
Nanoquitosa n/ carboximetilcelulosa	TiO ₂	Degradación de cristal violeta	(Sugashini y col., 2022)
Alginato de Calcio	TiO ₂	Degradación de naranja de metilo	(Zhao y col., 2014)
Quitosan	Nanopartículas magnéticas	Adsorción de cobre (II)	(Yuwei y col., 2011)

Una búsqueda de patentes otorgadas por país a nivel mundial, relacionadas con el empleo de nanocompuestos para el tratamiento de aguas, arroja que China posee el 79.0% de esas patentes, Estados Unidos de América 11.0 %, Corea 4.0 %, Japón 2.0 % y Rusia 1.0 %. En la Figura 2 se ilustra una gráfica con los resultados de la búsqueda realizada con la base de datos Scifinder. Cabe destacar que México no figura entre los países que patentan, a pesar que presenta graves problemas de contaminación en sus principales ríos. En los próximos años la agenda de investigación en México abordará el tema de tratamientos de aguas residuales y se espera la participación masiva de Universidades y Centros de Investigación de este país.



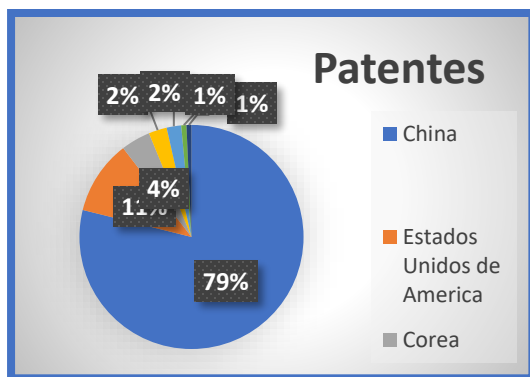


Figura 2. Patentes otorgadas por país, referente al uso de nanocompuestos para el tratamiento de agua. Fuente Scifinder

La patente IN201911018771 A 2020-11-13 se refiere a la fabricación de una tela no tejida con nanopartículas de óxidos metálicos como el ZnO, estas son impregnadas en la superficie de la tela no tejida empelando una dispersión de las NPs ZnO y agua destilada las cuales previamente se someten a sonicación para romper aglomerados, la aplicación es el tratamiento de agua para la eliminación de contaminantes y bacterias (Mangala y col., 2020). Por otra parte, la invención WO2022003252 A1 protege un proceso de obtención de polisacáridos a partir de una materia prima celulósica distinta de la madera y que sus componentes son solubles en agua. El producto obtenido se dirige a varios campos de aplicación, entre ellos el tratamiento de agua, este producto puede ser un aditivo o un componente que puede modificar las propiedades físicas y químicas de un compuesto (Laukkanen y col., 2022). La invención US20190388816 A1 proporciona el proceso de un material filtrante a partir de ácido poliláctico y nanopolvo de titania y se utiliza el método de soplado con aire para formar un material de fibra que tiene efectos filtrantes y capacidad fotocatalítica (Huang 2019). Asimismo, se patenta un método de preparación por electrohilado de una fibra compuesta de nanopartículas cerámicas y un polímero, comprende varios pasos: 1) dispersar las nanopartículas cerámicas en una mezcla de solventes; 2) añadir un vehículo textil con alto contenido de polímero calentar y agitar magnéticamente en un baño de agua y envejecer durante 2-12 h para obtener una suspensión de electrohilado; 3) realizar electrohilado con



la suspensión obtenida y 4) colocar la nanopartícula cerámica-/precursor cerámico/nanofibra compuesta de polímero en un crisol, y sinterizar a 500-1400°C para obtener la fibra nanocompuesta cerámica (Huaibei 2022).

La invención US20230183087 A1 2023-06-15 es acerca de un proceso de preparación de un nanocompuesto a base de quitosano y la síntesis de nanopartículas de SrO para la purificación de agua. La adición de quitosano dio lugar a nanocompuestos y estructuras en forma de varilla que condujeron a una mayor actividad catalítica durante la degradación de ciprofloxacina un fármaco y colorante azul de metileno en presencia de un agente reductor y en diferentes condiciones de pH (Goumri-Said, 2023).

Para la degradación de Rhodamina B y desinfección inhibiendo bacterias como *E.coli* y *S. aureus* la invención CN114505102 A 2022-05-17 se refiere un método para preparar un nanocompuesto de ZnO, polidopamina y AgO comprende varios pasos (1) disolver el precursor de las nanopartículas en solución acuosa, centrifugar la suspensión a temperatura ambiente y lavar y secar (2) agregar las nanohojas de ZnO a una solución tampón Tris-HCl, agitar magnéticamente, agregar clorhidrato de dopamina para reaccionar, centrifugar, lavar después de la precipitación y secar para obtener nanohojas de ZnO-PDA; y (3) agregar las nanohojas de ZnO-PDA a una solución de plata y amoníaco, agitar la reacción a temperatura ambiente, centrifugar, lavar el precipitado (Guo y col.,2022).

CONCLUSIONES

El tratamiento de agua residual es un reto hoy en día, es por eso que se buscan alternativas para la eliminación de contaminantes orgánicos e inorgánicos, en esta revisión se demuestra que los nanocompuestos a base de polímeros sintéticos y naturales son una excelente alternativa para el tratamiento de aguas residuales. La presencia de nanopartículas fotocatalíticas permite la degradación de contaminantes orgánicos,



además su eficiencia fue demostrada en la descontaminación de colorantes, bacterias, y metales pesados.

Se espera que estas tecnologías sean de utilidad para mejorar la calidad de agua y den respuesta al estrés hídrico que presenta México.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece la beca posdoctoral por México 387368 otorgada por el CONAHCYT. También se agradece a Maricela García Zamora y German Alvarado Tenorio por el apoyo otorgado.

REFERENCIAS

- Acuña-Piedra, A., Araya-Obando, A., & Romero-Esquivel, L. G. (2016). Selección teórica de adsorbentes potenciales naturales de bajo costo para la remoción de arsénico en el agua de consumo humano en Costa Rica. *Revista Tecnología en Marcha*, 29:23-34. <http://dx.doi.org/10.18845/tm.v29i6.2899>.
- Agboola, O., Fayomi, O. S. I., Ayodeji, A., Ayeni, A. O., Alagbe, E. E., Sanni, S. E. & Oni, B. A. (2021). A review on polymer nanocomposites and their effective applications in membranes and adsorbents for water treatment and gas separation. *Membranes*, 11(2): 139. <https://doi.org/10.3390/membranes11020139>
- Andrade-Guel, M., Ávila-Orta, C. A., Cabello-Alvarado, C., Cadenas-Pliego, G., Esparza-González, S. C., Pérez-Alvarez, M., & Quiñones-Jurado, Z. V. (2021). Non-Woven Fabrics Based on Nanocomposite Nylon 6/ZnO Obtained by Ultrasound-Assisted Extrusion for Improved Antimicrobial and Adsorption Methylene Blue Dye Properties. *Polymers*, 13(11): 1888. <https://doi.org/10.3390/polym13111888>
- Andrade-Guel, M., Cabello-Alvarado, C. J., Cadenas-Pliego, G., & Ávila-Orta, C. A. (2022). PLA-ZnO/TiO₂ Nanocomposite Obtained by Ultrasound-Assisted Melt-Extrusion for Adsorption of Methylene Blue. *Nanomaterials*, 12(23):4248. <https://doi.org/10.3390/nano12234248>
- Andrade-Guel, M. L., Cabello-Alvarado, C. J., Cano-Salazar, L. F., Ávila-Orta, C. A., & Cruz-Delgado, V. J. (2023). Recent Developments in Wastewater



Treatments. *Current Status of Fresh Water Microbiology*, (pp. 241-263). Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-99-5018-8_10

Andrade-Guel, M., Cabello-Alvarado, C., Romero-Huitzil, R. L., Rodríguez-Fernández, O. S., Ávila-Orta, C. A., Cadenas-Pliego, G., & Cepeda-Garza, J. (2021). Nanocomposite PLA/C20A nanoclay by ultrasound-assisted melt extrusion for adsorption of uremic toxins and methylene blue dye. *Nanomaterials*, 11(10):2477. <https://doi.org/10.3390/nano11102477>

Avila Orta, C.A., Hernández Rodríguez M.L., Lozano Morales S.A. (2021) Primera edición. Río Atoyac: Hacia una gestión integral de una problemática multifactorial. Ed. El colegio de Tlaxcala, Pp 120.

Azad, H., Mohsennia, M., Cheng, C., & Amini, A. (2021). Facile fabrication of PVB-PVA blend polymer nanocomposite for simultaneous removal of heavy metal ions from aqueous solutions: Kinetic, equilibrium, reusability and adsorption mechanism. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(5):106214. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106214>

Chen, A., Zeng, G., Chen, G., Hu, X., Yan, M., Guan, S., ... & Xie, G. (2012). Novel thiourea-modified magnetic ion-imprinted chitosan/TiO₂ composite for simultaneous removal of cadmium and 2, 4-dichlorophenol. *Chemical Engineering Journal*, 191:85-94. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.02.071>

Di Mauro, A., Cantarella, M., Nicotra, G., Pellegrino, G., Gulino, A., Brundo, M. V., ... & Impellizzeri, G. (2017). Novel synthesis of ZnO/PMMA nanocomposites for photocatalytic applications. *Scientific reports*, 7(1):1-12. <https://doi.org/10.1038/srep40895>

Dinari, M., & Haghighi, A. (2018). Ultrasound-assisted synthesis of nanocomposites based on aromatic polyamide and modified ZnO nanoparticle for removal of toxic Cr (VI) from water. *Ultrasonics sonochemistry*, 41:75-84. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.09.023>

Goumri-Said, Souraya; Kanoun, Mohammed Benali; Ali, Salamat; Haider, Junaid; Haider, Ali; Ikram, Muhammad, (2023) Method and process to make chitosan-doped strontium oxide nanocomposite for water purification, US20230183087 A1 2023-06-15

Gouthaman, A., Gnanaprakasam, A., Sivakumar, V. M., Thirumarimurugan, M., Ahamed, M. A. R., & Azarudeen, R. S. (2019). Enhanced dye removal using polymeric nanocomposite through incorporation of Ag doped ZnO nanoparticles: Synthesis and characterization. *Journal of hazardous materials*, 373:493-503. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.03.105>



- Guerritore, M., Castaldo, R., Silvestri, B., Avolio, R., Cocca, M., Errico, M. E., ... & Ambrogi, V. (2020). Hyper-crosslinked polymer nanocomposites containing mesoporous silica nanoparticles with enhanced adsorption towards polar dyes. *Polymers*, 12(6):1388. DOI: 10.3390/polym12061388
- Guo, Aiyang; Ling, Yun; Qin, Baoping; Cai, Aijun; Ji, Zhixin; Dong, Jing Method for preparing ZnO@polydopamine/Ag-Ag₂O nanocomposite material as photocatalyst having antibacterial activity and for sewage treatment, (2022) CN114505102 A 2022-05-17
- HuaiBei Normal University, Electrospinning preparation method of ceramic nano composite fiber (2022) CN115108829 A 2022-09-27.
- Huang, Qian, Melt-blown non-woven filter material (2019) US20190388816 A1 2019-12-26.
- Hyder, M. N., Huang, R. Y. M., & Chen, P. (2006). Correlation of physicochemical characteristics with pervaporation performance of poly (vinyl alcohol) membranes. *Journal of membrane science*, 283(1-2):281-290. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2006.06.045>
- Jaseela, P. K., Garvasis, J., & Joseph, A. (2019). Selective adsorption of methylene blue (MB) dye from aqueous mixture of MB and methyl orange (MO) using mesoporous titania (TiO₂)-poly vinyl alcohol (PVA) nanocomposite. *Journal of Molecular Liquids*, 286: 110908. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.110908>
- Laukkanen, A., McKee, J., Mertaniemi, H., Pahimanolis, N., Mononen, P., Lauraeus, M., A polysaccharide product and a process for treating raw material comprising non-wood cellulose. WO2022003252 A1 2022-01-06
- Mahmoodi, Z., Abhari, A. R., Lalehloo, R. S., Bakr, Z. H., & Ali, G. A. (2022). Thermodynamic studies on the adsorption of organophosphate pesticides (Diazinon) onto ZnO/polyethersulfone nanocomposites. *ChemistrySelect*, 7(2):e202103619. <https://doi.org/10.1002/slct.202103619>
- Mangala J., Kumar, Veerendra; Swarnkar, Yogesh Kumar; Roy, Anasuya. Antimicrobial Non-Woven Fabric for Safe Water Filtration. IN 201911018771 ·
- Mukhopadhyay, R., Bhaduri, D., Sarkar, B., Rusmin, R., Hou, D., xKhanam, R., ... & Ok, Y. S. (2020). Clay-polymer nanocomposites: Progress and challenges for use in sustainable water treatment. *Journal of hazardous materials*, 383:121125. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121125>



- Naushad, M., Ahamad, T., & Al-Sheetan, K. M. (2021). Development of a polymeric nanocomposite as a high performance adsorbent for Pb (II) removal from water medium: Equilibrium, kinetic and antimicrobial activity. *Journal of Hazardous Materials*, 407:124816. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124816>
- Osman, A. M., Hendi, A. H., & Saleh, T. A. (2020). Simultaneous adsorption of dye and toxic metal ions using an interfacially polymerized silica/polyamide nanocomposite: Kinetic and thermodynamic studies. *Journal of Molecular Liquids*, 314:113640. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.113640>
- Rahimpour, A. S. S. Madaeni, A. H. Taheri and Y. Mansourpanah: 'Coupling TiO₂ nanoparticles with UV irradiation for modification of polyethersulfone ultrafiltration membranes', *Journal of Membrane Science*, 2008, 313:158–169. [10.1016/j.memsci.2007.12.075](https://doi.org/10.1016/j.memsci.2007.12.075)
- Raj, A., Bethi, B., & Sonawane, S. H. (2018). Investigation of removal of crystal violet dye using novel hybrid technique involving hydrodynamic cavitation and hydrogel. *Journal of environmental chemical engineering*, 6(4):5311-5319. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.08.016>
- Romero–Serrano, A., & Pereira, J. (2020). Estado del arte: Quitosano, un biomaterial versátil. Estado del Arte desde su obtención a sus múltiples aplicaciones. *Revista INGENIERÍA UC*, 27(2):118-135.
- Saeed, K., Khan, I., Ahad, M., Shah, T., Sadiq, M., Zada, A., & Zada, N. (2021). Preparation of ZnO/Nylon 6/6 nanocomposites, their characterization and application in dye decolorization. *Applied Water Science*, 11(6):1-10. <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01442-0>
- Sotelo, J. L., Ovejero, G., Rodríguez, A., Álvarez, S., & García, J. (2013). Analysis and modeling of fixed bed column operations on flumequine removal onto activated carbon: pH influence and desorption studies. *Chemical engineering journal*, 228:102-113. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.04.088>
- Sugashini, S., Gomathi, T., Devi, R. A., Sudha, P. N., Rambabu, K., & Banat, F. (2022). Nanochitosan/carboxymethyl cellulose/TiO₂ biocomposite for visible-light-induced photocatalytic degradation of crystal violet dye. *Environmental Research*, 204:112047. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112047>
- Wang, D., Wang, Y., Li, X., Luo, Q., An, J., & Yue, J. (2008). Sunlight photocatalytic activity of polypyrrole–TiO₂ nanocomposites prepared by 'in situ' method. *Catalysis Communications*, 9(6): 1162-1166. <https://doi.org/10.1016/j.catcom.2007.10.027>



- Wen, Y., Yuan, J., Ma, X., Wang, S., & Liu, Y. (2019). Polymeric nanocomposite membranes for water treatment: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 17:1539-1551. <https://doi.org/10.1007/s10311-019-00895-9>
- World Resources Institute (2023) Disponible en: 25 países, una cuarta parte de la población mundial, enfrentan un estrés hídrico extremadamente alto | Instituto de Recursos Mundiales (WRI). Fecha de consulta 18 de septiembre del 2024.
- Yin, J., & Deng, B. (2015). Polymer-matrix nanocomposite membranes for water treatment. *Journal of membrane science*, 479:256-275. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2014.11.019>
- Yuwei, C., & Jianlong, W. (2011). Preparation and characterization of magnetic chitosan nanoparticles and its application for Cu (II) removal. *Chemical engineering journal*, 168(1): 286-292. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.01.006>
- Zhao K, Feng L, Li Z, Fu Y, Zhang X, Wei J, Wei S (2014) Preparation, characterization and photocatalytic degradation properties of a TiO₂/calcium alginate composite film and the recovery of TiO₂nanoparticles. *RSC Advance*, 2014, 4: 51321-51329. <https://doi.org/10.1039/C4RA08102A>

