

MATERIALES GEOPOLIMÉRICOS BIFUNCIONALES PARA LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EN AGUA

*BIFUNCTIONAL GEOPOLYMERIC MATERIALS FOR THE REMOVAL OF
CONTAMINANTS FROM WATER*

RESUMEN

El agua es un recurso que es contaminado con fármacos, colorantes y metales pesados proveniente de industrias y hogares, por lo tanto, es más escaso cada día. El agua contaminada debe ser limpiada por tecnologías eficientes y baratas como la adsorción y la fotocatálisis para volver a usarla otra vez. Existen materiales recientemente investigados llamados geopolímeros y pueden ser utilizados en ambas tecnologías para el tratamiento de aguas. En este artículo se investigaron varios trabajos enfocados al uso de geopolímeros como tecnologías adsorbentes y de fotocatálisis; y se compararon con la elaboración de tablas comparativas con características específicas de cada material reportado entre sí para determinar si en verdad pueden tener una bifuncionalidad de tratamiento de aguas por adsorción y por fotocatálisis.

Palabras clave: geopolímero, adsorción, fotodegradación, tratamiento de aguas

DYLAN ZAMORA CASTILLO

ANTONIA MARTÍNEZ
LUÉVANOS

CATALINA PÉREZ BERUMEN

SOFÍA ESTRADA FLORES

Facultad de Ciencias
Químicas, Unidad Sureste,
UAdeC.

ABSTRACT

Water is a resource that is contaminated with pharmaceuticals, dyes and heavy metals from industries and households, therefore, it is becoming scarcer every day. Polluted water must be cleaned by efficient and cheap technologies such as adsorption and photocatalysis to be used again. There are recently investigated materials called geopolymers and they can be used in both technologies for water treatment. In this article, several works focused on the use of

Correspondencia
aml15902@uadec.edu.mx

geopolymers as adsorbent and photocatalysis technologies were investigated and compared with the elaboration of comparative tables with specific characteristics of each reported material with each other to determine if they can indeed have a bifunctionality of water treatment by adsorption and photocatalysis.

Keywords: *geopolymer; adsorption; photodegradation; water treatment.*

INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso indispensable para el ser humano, se utiliza tanto para consumo individual como para la manufactura de productos. Con el aumento de la población y el crecimiento de ciudades e industrias el abastecimiento de agua limpia representa un gran problema (Magalhães-Ghiotto y col., 2021). La falta de agua limpia es debido a la contaminación de los efluentes por varios desechos industriales donde entra los colorantes provenientes de las industrias de pinturas, textiles, alimentos y plásticos (Umejuru y col., 2024). En las industrias y los hogares generan diferentes contaminantes orgánicos como fármacos, cosméticos y pesticidas (Shahid y col., 2021). Además, algunas industrias también contaminan el agua con iones de metales pesados (Sreenivasan & Kandasubramanian, 2023). Es bien sabido que se tiene acceso solo al uno por ciento del agua total del planeta, por lo que el tratamiento de aguas contaminadas generadas por la industria y por las personas en las ciudades, es una de las opciones más factible para cumplir con la demanda hídrica de los diferentes sectores que la requieren (Yu y col., 2021). El tratamiento de aguas se hace por varias tecnologías bien estudiadas por décadas como lo son el intercambio iónico, filtración y tratamientos biológicos; estos son considerados tecnologías tradicionales. Sin embargo, las tecnologías tradicionales presentan desventajas como baja selectividad, consumo alto de energía y eliminación ineficiente de contaminantes (Liu y col., 2020). A continuación, se describen más a detalle las tecnologías de adsorción y fotocatalíticas, así como los diferentes materiales adsorbentes y fotocatalíticos que se utilizan en estas.

MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología utilizada en este artículo científico consistió en hacer una búsqueda exhaustiva en bases de datos internacionales de prestigio, como *Scoopus* o *Sciene Direct*. Se hicieron búsquedas relacionadas con el tema y se seleccionó la información más relevante y de interés para este trabajo y se elaboraron gráficos y tablas de la información recabada. Se hicieron tablas comparativas de los diferentes geopolímeros haciendo énfasis en sus características como adsorbentes por ejemplo su área superficial, capacidad de adsorción máxima y eficiencia en la remoción y como foto degradadores por ejemplo su eficiencia de remoción. Las tablas son hechas con el objetivo de comparar la información disponible y hacer un análisis crítico sobre el doble uso de los geopolímeros como adsorbentes y fotocatalizadores para tratamiento de aguas.

DESARROLLO

ADSORCIÓN

La adsorción es un fenómeno superficial donde un contaminante se adhiere a la superficie de un sólido por medio de fuerzas de atracción en la superficie (Han y col., 2021). En la actualidad existen muchos materiales adsorbentes para el tratamiento de aguas, como materiales a base de carbón, minerales de tipo zeolitas, redes de compuestos metalorgánicos, Sílicas mesoporosas y arcillas (Fernández-Reyes y col., 2020). Los geomateriales o geopolímeros se han evaluado como materiales adsorbentes debido a que tiene la habilidad de limpiar el agua por adsorción, e incluso, por fotodegradación (El Alouani y col., 2021).

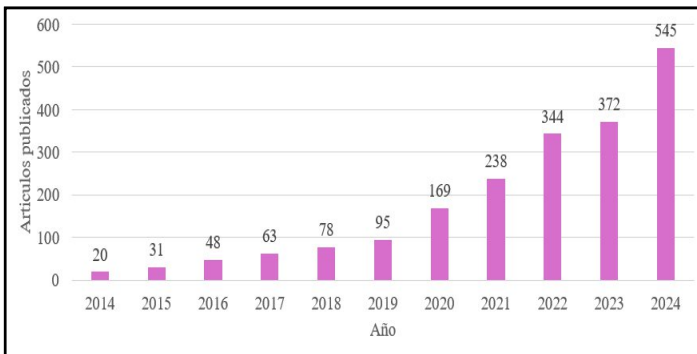
GEOPOLÍMEROS COMO ADSORBENTES

Los geopolímeros son polímeros inorgánicos considerados en la actualidad como alternativas ecológicas a los cementos y materiales de construcción tradicionales, ya que pueden ser elaborados con residuos inorgánicos, pero también se ha investigado más recientemente su aplicación en el campo del tratamiento de aguas residuales (Luukkonen y col., 2019; Sotelo-Piña y col., 2019). Los

geopolímeros presentan porosidad y valores altos de área superficial específica; son fabricados con materiales residuales y han presentado buenas eficiencias en la remoción de un amplio rango de contaminantes en aguas por adsorción, por ejemplo, metales pesados, contaminantes orgánicos y contaminantes emergentes. Los geopolímeros son buenos candidatos para sustituir materiales adsorbentes tradicionales como el carbón activado y las zeolitas, debido a su bajo costo de producción, alta cantidad de fuentes de precursores para su elaboración y sobre todo su esencia ecológica al medio ambiente (Elgarahy y col., 2023).

A pesar de que la adsorción es una tecnología tradicional, las investigaciones sobre la utilización de geopolímeros como adsorbentes han sugerido que la tecnología de adsorción solo necesita actualizarse con el uso de nuevos materiales y optimizarse. Actualmente, han sido investigados diversos geopolímeros para la remoción de varios contaminantes, por ejemplo, en 2022 Tunali Akar y col., optimizaron el proceso de adsorción de Cu^{2+} en soluciones acuosas con un geopolímero a base de metacaolín, concluyendo que el material evaluado es una alternativa renovable, ecológica y de bajo costo (Tunali Akar y col., 2022). Otro caso sobre el uso de geopolímeros como adsorbentes fue investigado por Yang S, y col., en 2020; se investigó sobre la mejor ruta para obtener microesferas de un geopolímero a base de metacaolín, con el objetivo de empaquetarlas en una columna de flujo continuo para adsorber plomo de un medio acuoso. Además, propusieron las condiciones más adecuadas para obtener una mayor eficiencia en la remoción de este contaminante (Yang y col., 2020). Un caso más del uso de geopolímeros adsorbentes, fue estudiado en 2019 por El Alouani y col.; Estos investigadores desarrollaron un geopolímero a base de metacaolín y evaluaron su potencial para remover azul de metileno de un medio acuoso, confirmando su potencial uso como adsorbente de azul de metileno en medios acuosos (El Alouani y col., 2019a). Los geopolímeros tienen el potencial de remover radionúclidos de cesio de soluciones acuosas, como lo reportó Xiang y col. (2021). En su investigación desarrollaron geopolímeros a base de metacaolín en presentación de espumas, concluyendo que este material tiene potencial para la remoción de contaminantes como ^{137}Cs . (Xiang y col., 2021).

Los geopolímeros son alternativas ecológicas y de bajo costo para usarse como materiales adsorbentes, no obstante, se puede abaratar aún más la producción de estos novedosos materiales utilizando precursores que por su naturaleza se clasifican como residuos o desecho. Lin Li y col. (2006) realizaron una investigación enfocada en el desarrollo de un geopolímero adsorbente a base ceniza



volante, el cual es un residuo industrial (Sen & De, 1987). En este trabajo se utilizó la ceniza volante como uno de los precursores para elaborar un geopolímero. Por medio de un análisis cinético y termodinámico se observó que el material geopolimérico posee una mayor capacidad de adsorción de colorantes como el azul de metileno y el cristal violeta que la ceniza volante (Li y col., 2006). En la Figura 1 se presenta un esquema del uso de geopolímeros como adsorbentes, en este caso de azul de metileno en solución acuosa.

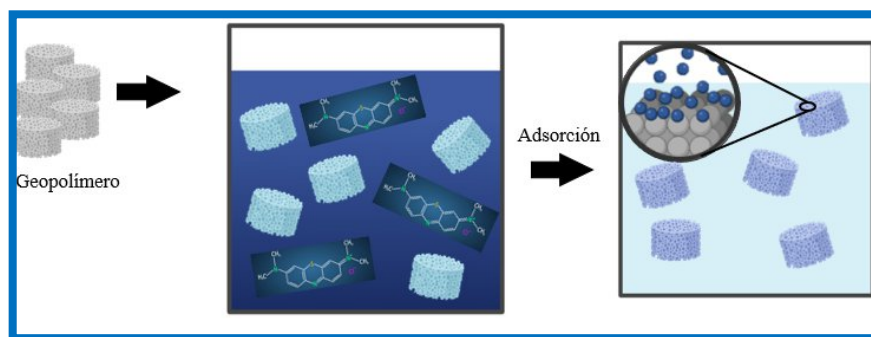


Figura 1. Esquema del proceso de adsorción de azul de metileno con un geopolímero poroso.

Los geopolímeros se siguen investigando como adsorbentes y su relevancia crece día con día. A continuación, se presenta la evolución de la cantidad de artículos sobre el tratamiento de aguas por adsorción con geopolímeros y su posible uso para remoción de contaminantes en medios acuosos que iustifica lo an-teriormente men-cionado del

año 2014 al 2024.

Adicionalmente, se hizo una búsqueda rápida en *Science Direct* relacionando los términos “*geopolymer and adsorption and industrial waste and water treatment*”, y se tomaron los datos de los últimos diez años.

Figura 2. Artículos publicados relacionados con el uso de geopolímeros derivados de residuos industriales como adsorbentes de contaminantes en aguas de los últimos 10 años.

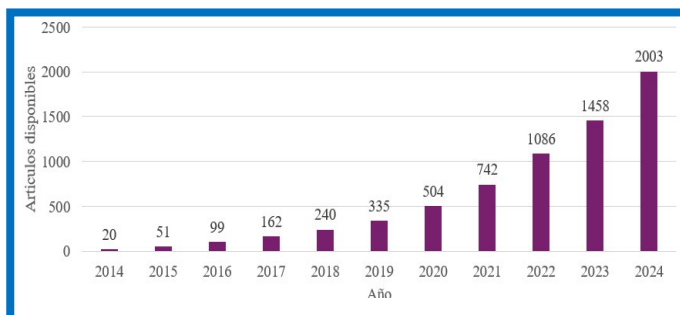


Figura 3. Artículos disponibles relacionados con el uso de geopolímeros derivados de residuos industriales como adsorbentes de contaminantes en aguas durante

La cantidad de artículos sobre el uso de geopolímeros como adsorbentes para el tratamiento de agua incrementó lento del 2014 al 2019, mientras que el incremento fue mayor del 2019 a la fecha. Con la información obtenida se hizo una gráfica, que representa la cantidad de información disponible cada año respecto al uso de geopolímeros derivados de residuos industriales para la adsorción de contaminantes en medios acuosos.

El crecimiento de artículos disponibles por año incrementó linealmente del 2014 al 2017, mientras que a partir del 2017 incrementó exponencialmente. Las gráficas presentadas indican que las investigaciones dirigidas al uso de geopolímeros como adsorbentes van en aumento.

FOTOCATÁLISIS

La fotocatálisis de contaminantes en el agua es un método relativamente nuevo, junto con la adsorción es más preferible sobre otros métodos tradicionales debido a que permite eliminar de manera eficiente y rápida a algunos contaminantes en el agua, además de ser de bajo costo (Sponza, 2023). La fotocatálisis ocurre cuando los electrones de valencia de un semiconductor son promovidos con la ayuda de energía proveniente de la radiación UV, hacia una banda de

conducción, generando así unos huecos en la superficie y especies inestables y reactivas como los radicales que son altamente oxidantes y que si se encuentran en presencia de alguna especie u contaminante presentes en medios acuosos por ejemplo, pueden reaccionar y mineralizar el contaminante presente en el medio por lo que queda el medio limpio de ese contaminante (Parimaladevi y col., 2020).

GEOPOLÍMEROS COMO FOTOCATALIZADORES

los átomos dentro de los semiconductores pueden ser algunos metales que brindan características fotocatalíticas, por lo que estos metales como Calcio, sodio o potasio pueden ser sustituidos por compuestos clasificados como semiconductores, brindándoles propiedades fotocatalíticas. aunque también pueden ser soportes para estas partículas de semiconductores variados (Asim y col., 2019). De manera resumida se puede mencionar que los geopolímeros pueden fotocatalizar compuestos orgánicos cuando durante el proceso de formación de los geopolímeros se agregan semiconductores u óxidos como Fe_2O_3 , TiO_2 , Al_2O_3 y MgO , siempre y cuando estén lo más superficialmente posibles en el material, esto es debido a que las propiedades de catalíticas del geopolímero se presentan cuando el material está funcionalizado o modificado en su superficie (Rasaki y col., 2019).

En los últimos años se han hecho investigaciones con geopolímeros modificados para que posean propiedades fotocatalíticas. Estos geopolímeros modificados han sido evaluados en la remoción de algunos contaminantes orgánicos. En la literatura se reportan la síntesis caracterización y evaluación de tres geopolímeros que fueron obtenidos a base de ceniza volante, escoria de alto horno y escoria de acero, los cuales fueron modificados con iones de níquel y cobre para brindarles propiedades fotocatalíticas. La evaluación de estos materiales como fotocatalizadores se realizó sobre la fotodegradación de azul de metileno y rojo Congo. Se obtuvo una alta eficiencia (>90%), la cual se debe en gran parte a la alta porosidad y gran cantidad de sitios activos. Estos resultados indican que el uso de geopolímeros modificados son una buena opción para eliminación de colorantes, como el azul de metileno y el rojo congo (Zhang y col., 2015).

Chen y col. (2017) reportan la síntesis de un geopolímero a base de metacaolín y ceniza volante, la cual posteriormente se le depositaron

capas de óxido de titanio por inmersión por el método de sol-gel. Donde se evaluó su actividad fotocatalítica y se determinó que su eficiencia para eliminar azul de metileno, observando eficiencia de remoción de entre 70% y 85%, sin embargo, el trabajo no es tan concluyente y no da un resultado enfocado hacia la eficiencia del geopolímero, más bien enfocado a la optimización de la síntesis del material en cuestión (Chen y col., 2017).

Otro trabajo de interés fue publicado en 2015 por Falah y Mackenzie, donde se desarrolló un compuesto geopolimérico derivado del metacaolín, con nano esferas de $\text{Cu}_2\text{O}/\text{TiO}_2$, para generar un material fotocatalítico para la remoción de azul de metileno. Los resultados obtenidos indicaron que el colorante es removido por medio de un proceso dual de adsorción y fotodegradación. El uso de geopolímeros porosos modificados con fotocatalizadores, es una buena opción para la remoción de azul de metileno de medios acuosos (Falah & MacKenzie, 2015).

Mahroo Falah y col. (2016) desarrollaron un compuesto geopolimérico; se adicionaron partículas de un fotocatalizador heterogéneo $\text{Cu}_2\text{O}/\text{TiO}_2$. El compuesto obtenido fue caracterizado y evaluado en la remoción de azul de metileno en medio acuoso; se concluyó que este nuevo material es realmente eficiente en la eliminación del azul de metileno en medio acuoso, a diferencia de otros trabajos donde se elaboran materiales similares, pero sin modificar la matriz geopolimérica (Falah y col., 2016).

Jaramillo Fierro y col. (2023) desarrollaron un sistema fotoactivo y adsorbente a base de metacaolín y un semiconductor heterogéneo $\text{ZnTiO}_3/\text{TiO}_2$. Se caracterizó y evaluó como removedor de azul de metileno en muestra modelo. La investigación dio como resultados una buena remoción del azul de metileno de una solución acuosa, un sistema muy estable que se puede reutilizar varias veces, además que se enfatizó sobre una estrecha relación entre la capacidad de adsorción del material y su capacidad de reaccionar fotoactivamente con el azul de metileno (Jaramillo-Fierro y col., 2023). En la figura 4 se presenta un esquema del uso de geopolímeros modificados para la fotodegradación, en este caso de azul de metileno en solución acuosa.

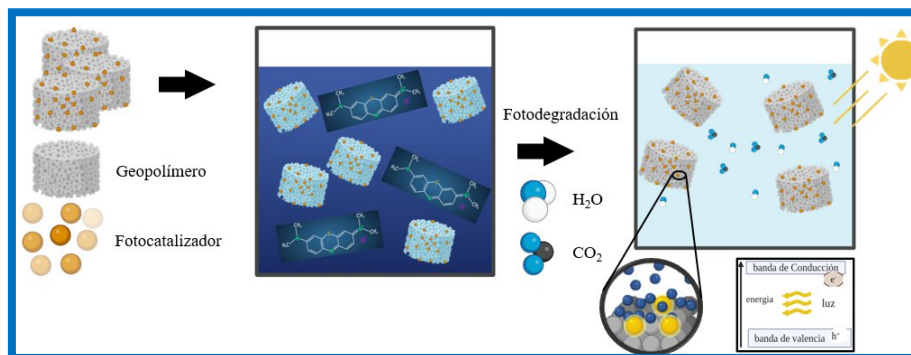


Figura 4. Esquema del proceso de fotodegradación del azul de metileno con un geopolímero modificado.

Los geopolímeros tienen mucho potencial de investigación para degradar contaminantes del agua por fotocatalisis en la actualidad. Para justificar lo mencionado se hizo una búsqueda rápida en *Science Direct* relacionando los términos “*geopolymer AND photocatalysis AND water treatment*” de los últimos diez años.

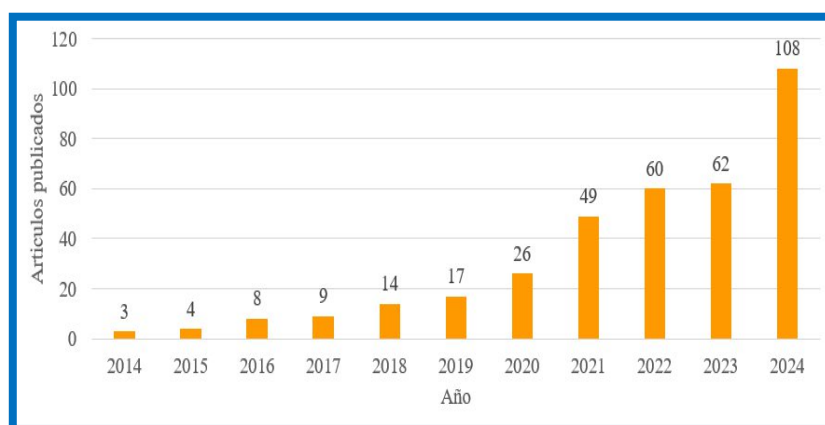


Figura 5. Artículos publicados relacionados con el uso de geopolímeros fotocatalíticos para la degradación de contaminantes en aguas de los últimos 10 años.

La cantidad de artículos sobre el uso de geopolímeros fotocatalíticos para la degradación de contaminantes en el agua incrementó lento del 2014 al 2017, mientras que el incremento fue mayor del 2017 a la fecha. Con la información obtenida se hizo una gráfica que representa la cantidad de información disponible cada año respecto al uso de geopolímeros fotocatalíticos para la degradación de contaminantes en aguas.

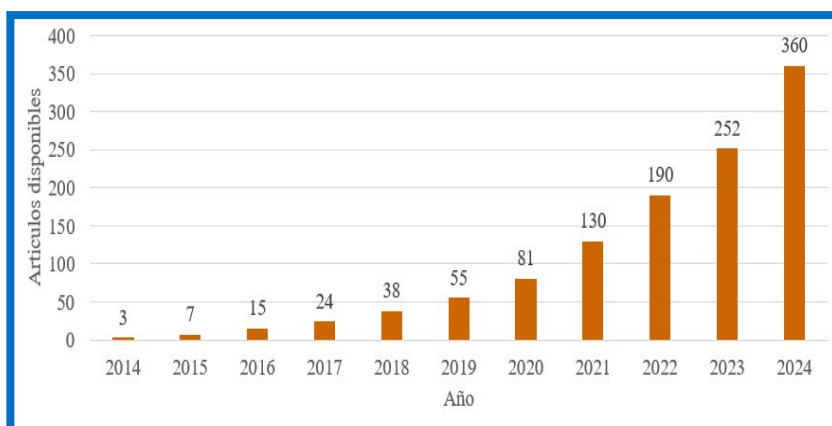


Figura 6. Artículos disponibles relacionados con el uso de geopolímeros fotocatalíticos para la degradación de contaminantes en aguas de los últimos 10 años.

La cantidad de información cada sobre el uso de geopolímeros fotocatalíticos para la degradación de contaminantes en el agua incrementó lento del 2014 al 2018, mientras que la cantidad de información disponible incrementó del 2018 a la fecha.

DISCUSIÓN

Se elaboraron varias tablas para tener información más condensada y poder obtener una conclusión solida del tema de investigación. A continuación, se presenta una tabla que nos ayudará a comparar varios geopolímeros en función a sus características como adsorbentes.

Tabla 3. Comparación entre geopolímeros para la adsorción de azul de metileno.

Material	Características como adsorbente			Contaminante	Referencia
	área de superfic	Q _{max} mg/g	% remoción		

	ie m ² /g				
Geopolímero derivado de ceniza volante	67.62	50.7	98	Azul de metileno	(Y. Liu, Yan, Zhang, Gong, y col., 2016)
Geopolímero a base de metacaolín	-	43.48	-	Azul de metileno	(El Alouani y col., 2019b)
Geopolímero a base de ceniza volante	3.66	84	-	Azul de metileno	(Kaewmee y col., 2020)
Geopolímero verde en pasta	13.2	79.7	86.8	Azul de metileno	(Maleki y col., 2020)
Geopolímero derivado de ceniza volante	-	79.7	94.3	Azul de metileno	(Novais y col., 2019)
Geopolímero derivado de metacaolín	26.4	79.7	96	Azul de metileno	(Jin y col., 2021)

Se puede observar que los geopolímeros pueden llegar a poseer áreas superficiales específicas muy variadas, no obstante, por las capacidades máximas de adsorción ($Q_{\max}$) y los porcentajes de remoción disponibles se puede apreciar que los geopolímeros son buenos adsorbentes de colorantes como el azul de metileno. Se puede observar de igual manera que sus eficiencias (% remoción) son muy altas por lo que pueden limpiar el agua casi por completo. A continuación, se presenta una tabla donde se comparan varios geopolímeros con algunas de sus características como adsorbentes de diferentes fármacos.

Tabla 4. Comparación entre geopolímeros para la adsorción de fármacos.

Material	Características como adsorbente			Contaminante	Referencia
	área de superficie m ² /g	$Q_{\max}$ mg/g	% remoción		
Geopolímero a base de metacaolín	-	29 ¹ 0.47 ²	95 ¹ 8 ²	Ofloxacino ¹ y cortisona ²	(Tarantino y col., 2024)
Perlas híbridas de alginato/geopolímero	9.53	6.2	80	5-fluorouracilo	(Ben Amor y col., 2023)
Geopolímero de lodos de metacaolín con hidroxiapatita	8.86	13	25.6	ciprofloxacino	(Arokiasam y col., 2024)

En base a la tabla de artículos encontrados se puede observar que existe escasa información sobre el tema. También se puede apreciar que todas las características como adsorbentes para el caso de

fármacos son muy variadas, por lo que existen áreas de oportunidad en el estudio de geopolímeros como adsorbentes de fármacos. En la siguiente tabla se pueden observar varios geopolímeros adsorbentes de iones metales pesados de igual manera comparando sus características como adsorbentes.

Tabla 5. Comparación entre geopolímeros para la adsorción de iones de metales pesados.

Material	Características como adsorbente			Contaminante	Referencia
	área de superficie m ² /g	Q _{max} mg/g	% remoción		
Geopolímero de restos de ceniza volante	-	152	87.7	Cu ²⁺	(Al-Harashsheh y col., 2015)
Geopolímero de ceniza volante con relaves de mineral de hierro	-	113.41	90.7	Cu ²⁺	(Duan y col., 2016)
Geopolímero a base de metacaolín	31.83	108.2, 95.3	-	Cu ²⁺ , Cr ⁶⁺	(Z. Yu y col., 2020)
Geopolímero de toba zeolítica y metacaolín	-	7.8	-	Cu ²⁺	(Alshaaer y col., 2015)
Geopolímero de toba zeolítica y metacaolín	-	57.2	-	Cu ²⁺	(El-Eswed y col., 2012)
Geopolímero a base de metacaolín	65.7	147.06, 48.78, 19.94, 67.57	-	Pb ²⁺ , Cu ²⁺ , Cr ³⁺ , Cd ²⁺	(Cheng y col., 2012)
Geopolímero a base de ceniza volante	-	183.605	-	Pb ²⁺	(Al-Zboon y col., 2011)
Geopolímero a base de ceniza volante	20.48	118.6	-	Pb ²⁺	(Y. Liu, Yan, Zhang, Wang, y col., 2016)
Geopolímero en forma de microesferas	100.99	629.21	-	Pb ²⁺	(Tang y col., 2018)
Geopolímero a base de metacaolín	27.5	35	-	Pb ²⁺	(López y col., 2014)

Por la cantidad de trabajos encontrados se puede observar que los

geopolímeros han sido investigados como adsorbentes de diferentes iones de metales pesados de manera muy amplia y exhaustiva. Por los datos obtenidos para hacer la comparativa entre geopolímeros, se puede apreciar altas capacidades de adsorción ($Q_{\max}$) de iones metálicos como el Cu(II), el Pb(II) y el Cr(VI) en soluciones acuosas. También se puede observar que la mayoría de los trabajos encontrados fueron de geopolímeros con precursores como ceniza volante y metacaolín por lo que se puede argumentar que los geopolímeros derivados de estos precursores, tienen buenas capacidades de adsorber iones de metales pesados como plomo, cobre y cromo en su forma de iones. Se presenta una tabla más donde se comparan la eficiencia de los geopolímeros con funciones fotocatalíticas para la remoción de algunos contaminantes orgánicos del agua.

Tabla 6. Comparación entre geopolímeros para la remoción de contaminantes orgánicos.

Material	Resultados	Contaminante	Referencia
Composito con matriz geopolimérica derivada de escoria de silicomanganeso con partículas de CaMoO_4	64.76 % degradación	Violeta básico-5	(He y col., 2019)
Geopolímero de metacaolín con $\text{Cu}_2\text{O}/\text{TiO}_2$	>98% degradación	Azul de metileno	(Falah & MacKenzie, 2015)
Geopolímero de ceniza volante	Buena catálisis	Reacción de catálisis de Friedel-Craft	(Alzeer & MacKenzie, 2018)
Geopolímero de ceniza volante y catalizador de TiO_2 y Fe_2O_3	92.79	Azul de metileno	(Y. Zhang & Liu, 2013)
Geopolímero de escoria del acero con iones de Ni^+	94.39	Azul de metileno	(Y. J. Zhang y col., 2012)
Geopolímero con TiO_2	50	Rodamina-B	(Llano-Guerrero y col., 2020)
Geopolímero con biocharcona	99	tetraciclina	(Huang et al., 2020)
Geopolímero de metacaolín con TiO_2	Degradación exitosa	2-butanona	(Gasca-Tirado y col., 2014)

En base a la información obtenida se puede observar que los geopolímeros con fotocatalizadores son utilizados en su mayoría para la eliminación de colorantes en medios acuoso, sin embargo, hay unas cuantas investigaciones enfocadas en la eliminación de otros compuestos orgánicos como tetraciclina y 2-butanona, esto nos

permite resaltar el potencial área de investigación de estos novedosos materiales y ampliar la gama de tecnologías recientes para la eliminación de contaminantes orgánicos en el agua. En base a la información de la eficiencia de degradación de contaminantes, se puede observar que los geopolímeros con propiedades fotocatalíticas son una excelente opción para la eliminación de contaminantes orgánicos del agua ya que en general eliminan hasta el 99% del contaminante.

CONCLUSIONES

La foto degradación de fármacos con fotocatalizadores soportados sobre geopolímeros no está tan investigada, por lo que existe una potencial área de investigación. Los geopolímeros presentan una doble funcionalidad como materiales adsorbentes y fotocatalíticos; pueden adsorber y fotodegradar de manera eficiente iones de metales pesados y contaminantes orgánicos. Los materiales geopoliméricos bifuncionales prometen ser una buena alternativa para la eliminación de contaminantes en el agua.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al CONAHCYT por la beca otorgada (CVU: 2002328) otorgada a Dylan Zamora Castillo para sus estudios de maestría.

REFERENCIAS

- Al-Harashseh, M. S., Al Zboon, K., Al-Makhadmeh, L., Hararah, M., & Mahasneh, M. (2015). Fly ash based geopolymer for heavy metal removal: A case study on copper removal. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 3(3), 1669–1677. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2015.06.005>
- Alshaaer, M., Zaharaki, D., & Komnitsas, K. (2015). Microstructural characteristics

and adsorption potential of a zeolitic tuff–metakaolin geopolymer. *Desalination and Water Treatment*, 56(2), 338–345. <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.938306>

Al-Zboon, K., Al-Harabsheh, M. S., & Hani, F. B. (2011). Fly ash-based geopolymer for Pb removal from aqueous solution. *Journal of Hazardous Materials*, 188(1–3), 414–421. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.01.133>

Alzeer, M. I. M., & MacKenzie, K. J. D. (2018). Synthesis and Catalytic Properties of New Sustainable Aluminosilicate Heterogeneous Catalysts Derived from Fly Ash. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 6(4), 5273–5282. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b04923>

Arokiasamy, P., Abdullah, M. M. A. B., Abd Rahim, S. Z., Victor Sandu, A., Fedrigo, A., Ediaty, R., Ishak, S., & Mohd Kaus, N. H. (2024). Hydroxyapatite incorporated metakaolin/sludge based geopolymer adsorbent for copper ions and ciprofloxacin removal: Synthesis, characterization and mechanisms. *Arabian Journal of Chemistry*, 17(5), 105745. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2024.105745>

Asim, N., Alghoul, M., Mohammad, M., Amin, M. H., Akhtaruzzaman, M., Amin, N., & Sopian, K. (2019). Emerging sustainable solutions for depollution: Geopolymers. *Construction and Building Materials*, 199, 540–548. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.043>

Ben Amor, A., Arenas, M., Martín, J., Ouakouak, A., Santos, J. L., Aparicio, I., Alonso, E., & Hamdi, N. (2023). Alginate/geopolymer hybrid beads as an innovative adsorbent applied to the removal of 5-fluorouracil from contaminated environmental water. *Chemosphere*, 335, 139092. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139092>

Chen, L., Zheng, K., & Liu, Y. (2017). Geopolymer-supported photocatalytic TiO₂ film: Preparation and characterization. *Construction and Building Materials*, 151, 63–70. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.097>

Cheng, T. W., Lee, M. L., Ko, M. S., Ueng, T. H., & Yang, S. F. (2012). The heavy metal adsorption characteristics on metakaolin-based geopolymer. *Applied Clay Science*, 56, 90–96. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2011.11.027>

Duan, P., Yan, C., Zhou, W., & Ren, D. (2016). Development of fly ash and iron ore tailing based porous geopolymer for removal of Cu(II) from wastewater. *Ceramics International*, 42(12), 13507–13518. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.05.143>

El Alouani, M., Alehyen, S., El Achouri, M., & Taibi, M. (2019a). Preparation, Characterization, and Application of Metakaolin-Based Geopolymer for Removal of Methylene Blue from Aqueous Solution. *Journal of Chemistry*, 2019, 1–14. <https://doi.org/10.1155/2019/4212901>

- El Alouani, M., Alehyen, S., El Achouri, M., & Taibi, M. (2019b). Preparation, Characterization, and Application of Metakaolin-Based Geopolymer for Removal of Methylene Blue from Aqueous Solution. *Journal of Chemistry*, 2019, 1–14. <https://doi.org/10.1155/2019/4212901>
- El Alouani, M., Saufi, H., Moutaoukil, G., Alehyen, S., Nematollahi, B., Belmaghraoui, W., & Taibi, M. (2021). Application of geopolymers for treatment of water contaminated with organic and inorganic pollutants: State-of-the-art review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(2), 105095. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105095>
- El-Eswed, B., Alshaaer, M., Ibrahim Yousef, R., Hamadneh, I., & Khalili, F. (2012). Adsorption of Cu(II), Ni(II), Zn(II), Cd(II) and Pb(II) onto Kaolin/Zeolite Based- Geopolymers. *Advances in Materials Physics and Chemistry*, 02(04), 119–125. <https://doi.org/10.4236/ampc.2012.24B032>
- Elgarahy, A. M., Maged, A., Eloffy, M. G., Zahran, M., Kharbish, S., Elwakeel, K. Z., & Bhatnagar, A. (2023). Geopolymers as sustainable eco-friendly materials: Classification, synthesis routes, and applications in wastewater treatment. *Separation and Purification Technology*, 324, 124631. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.124631>
- Falah, M., & MacKenzie, K. J. D. (2015). Synthesis and properties of novel photoactive composites of P25 titanium dioxide and copper (I) oxide with inorganic polymers. *Ceramics International*, 41(10), 13702–13708. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.07.198>
- Falah, M., MacKenzie, K. J. D., Knibbe, R., Page, S. J., & Hanna, J. V. (2016). New composites of nanoparticle Cu (I) oxide and titania in a novel inorganic polymer (geopolymer) matrix for destruction of dyes and hazardous organic pollutants. *Journal of Hazardous Materials*, 318, 772–782. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.06.016>
- Fernández-Reyes, B., Ortiz-Martínez, K., Lasalde-Ramírez, J. A., & Hernández-Maldonado, A. J. (2020). Engineered adsorbents for the removal of contaminants of emerging concern from water. En *Contaminants of Emerging Concern in Water and Wastewater* (pp. 3–45). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813561-7.00001-8>
- Gasca-Tirado, J. R., Manzano-Ramírez, A., Vazquez-Landaverde, P. A., Herrera-Díaz, E. I., Rodríguez-Ugarte, M. E., Rubio-Ávalos, J. C., Amigó-Borrás, V., & Chávez-Páez, M. (2014). Ion-exchanged geopolymer for photocatalytic degradation of a volatile organic compound. *Materials Letters*, 134, 222–224. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2014.07.090>
- Han, D., E, J., Deng, Y., Chen, J., Leng, E., Liao, G., Zhao, X., Feng, C., & Zhang, F. (2021). A review of studies using hydrocarbon adsorption material for reducing hydrocarbon emissions from cold start of gasoline engine.

Renewable and Sustainable Energy Reviews, 135, 110079.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110079>

- He, P. Y., Zhang, Y. J., Chen, H., & Liu, L. C. (2019). Development of an eco-efficient CaMoO₄/electroconductive geopolymer composite for recycling silicomanganese slag and degradation of dye wastewater. *Journal of Cleaner Production*, 208, 1476–1487. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.176>
- Huang, J., Li, Z., Zhang, J., Zhang, Y., Ge, Y., & Cui, X. (2020). In-situ synchronous carbonation and self-activation of biochar/geopolymer composite membrane: Enhanced catalyst for oxidative degradation of tetracycline in water. *Chemical Engineering Journal*, 397, 125528. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.125528>
- Jaramillo-Fierro, X., Gaona, S., Ramón, J., & Valarezo, E. (2023). Porous Geopolymer/ZnTiO₃/TiO₂ Composite for Adsorption and Photocatalytic Degradation of Methylene Blue Dye. *Polymers*, 15(12), 2697. <https://doi.org/10.3390/polym15122697>
- Jin, H., Zhang, Y., Wang, Q., Chang, Q., & Li, C. (2021). Rapid removal of methylene blue and nickel ions and adsorption/desorption mechanism based on geopolymer adsorbent. *Colloid and Interface Science Communications*, 45, 100551. <https://doi.org/10.1016/j.colcom.2021.100551>
- Kaewmee, P., Song, M., Iwanami, M., Tsutsumi, H., & Takahashi, F. (2020). Porous and reusable potassium-activated geopolymer adsorbent with high compressive strength fabricated from coal fly ash wastes. *Journal of Cleaner Production*, 272, 122617. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122617>
- Li, L., Wang, S., & Zhu, Z. (2006). Geopolymeric adsorbents from fly ash for dye removal from aqueous solution. *Journal of Colloid and Interface Science*, 300(1), 52–59. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2006.03.062>
- Liu, H.-Y., Niu, C.-G., Guo, H., Liang, C., Huang, D.-W., Zhang, L., Yang, Y.-Y., & Li, L. (2020). In situ constructing 2D/1D MgIn₂S₄/CdS heterojunction system with enhanced photocatalytic activity towards treatment of wastewater and H₂ production. *Journal of Colloid and Interface Science*, 576, 264–279. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2020.05.025>
- Liu, Y., Yan, C., Zhang, Z., Gong, Y., Wang, H., & Qiu, X. (2016). A facile method for preparation of floatable and permeable fly ash-based geopolymer block. *Materials Letters*, 185, 370–373. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2016.09.044>
- Liu, Y., Yan, C., Zhang, Z., Wang, H., Zhou, S., & Zhou, W. (2016). A comparative study on fly ash, geopolymer and faujasite block for Pb removal from

aqueous solution. *Fuel*, 185, 181–189. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.07.116>

Llano-Guerrero, E. A., Gómez-Zamorano, L. Y., & Jiménez-Relinque, E. (2020). Effect of the addition of TiO₂ nanoparticles in alkali-activated materials. *Construction and Building Materials*, 245, 118370. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118370>

López, F. J., Sugita, S., Tagaya, M., & Kobayashi, T. (2014). Metakaolin-Based Geopolymers for Targeted Adsorbents to Heavy Metal Ion Separation. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, 02(07), 16–27. <https://doi.org/10.4236/msce.2014.27002>

Luukkonen, T., Heponiemi, A., Runtti, H., Pesonen, J., Yliniemi, J., & Lassi, U. (2019). Application of alkali-activated materials for water and wastewater treatment: a review. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 18(2), 271–297. <https://doi.org/10.1007/s11157-019-09494-0>

Magalhães-Ghiotto, G. A. V., Oliveira, A. M. de, Natal, J. P. S., Bergamasco, R., & Gomes, R. G. (2021). Green nanoparticles in water treatment: A review of research trends, applications, environmental aspects and large-scale production. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 16, 100526. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2021.100526>

Maleki, A., Mohammad, M., Emdadi, Z., Asim, N., Azizi, M., & Safaei, J. (2020). Adsorbent materials based on a geopolymer paste for dye removal from aqueous solutions. *Arabian Journal of Chemistry*, 13(1), 3017–3025. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2018.08.011>

Novais, R. M., Carvalheiras, J., Tobaldi, D. M., Seabra, M. P., Pullar, R. C., & Labrincha, J. A. (2019). Synthesis of porous biomass fly ash-based geopolymer spheres for efficient removal of methylene blue from wastewaters. *Journal of Cleaner Production*, 207, 350–362. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.265>

Parimaladevi, R., Umadevi, M., Rekha, T. N., & Benial, A. M. F. (2020). TiO₂-based nanomaterials for wastewater treatment. En *Nanotechnology in the Beverage Industry* (pp. 3–24). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819941-1.00001-8>

Rasaki, S. A., Bingxue, Z., Guarecuco, R., Thomas, T., & Minghui, Y. (2019). Geopolymer for use in heavy metals adsorption, and advanced oxidative processes: A critical review. *Journal of Cleaner Production*, 213, 42–58. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.145>

Sen, A. K., & De, A. K. (1987). Adsorption of mercury(II) by coal fly ash. *Water Research*, 21(8), 885–888. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(87\)80003-](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(87)80003-)

- Shahid, M. K., Kashif, A., Fuwad, A., & Choi, Y. (2021). Current advances in treatment technologies for removal of emerging contaminants from water – A critical review. *Coordination Chemistry Reviews*, 442, 213993. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2021.213993>
- Sotelo-Piña, C., Aguilera-González, E. N., & Martínez-Luévanos, A. (2019). Geopolymers: Past, Present, and Future of Low Carbon Footprint Eco-materials. En *Handbook of Ecomaterials* (pp. 2765–2785). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-68255-6_54
- Sponza, D. T. (2023). The Use of a Novel Graphitic Carbon Nitride/Cobalt Molybdate (G-C3 n4 /ComoO4) Nanocomposites for the Doxycycline Removal by Photocatalytic Degradation in Pharmaceutical Industry Wastewaters and the Evaluation of Microtox (*Aliivibrio Fischeri*) and *Daphnia Magna* Acute Toxicity Assays. *Journal of Material Sciences & Manufacturing Research*, 1–17. [https://doi.org/10.47363/JMSMR/2023\(4\)149](https://doi.org/10.47363/JMSMR/2023(4)149)
- Sreenivasan, S., & Kandasubramanian, B. (2023). Novel geomaterials for the remediation of toxic pollutants: A review. *Hybrid Advances*, 3, 100057. <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2023.100057>
- Tang, Q., Wang, K., Yaseen, M., Tong, Z., & Cui, X. (2018). Synthesis of highly efficient porous inorganic polymer microspheres for the adsorptive removal of Pb²⁺ from wastewater. *Journal of Cleaner Production*, 193, 351–362. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.094>
- Tarantino, S. C., Occhipinti, R., Maraschi, F., Zema, M., Riccardi, M. P., Profumo, A., & Sturini, M. (2024). Porous metakaolin-based geopolymers for adsorption of Contaminants of Emerging Concern from wastewaters. *Applied Clay Science*, 259, 107502. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2024.107502>
- Tunali Akar, S., Çolo, H., Sayin, F., Kara, I., & Akar, T. (2022). Parametric optimization of Cu(II) removal process by a metakaolin-based geopolymer: Batch and continuous process design. *Journal of Cleaner Production*, 366, 132819. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132819>
- Umejuru, E. C., Street, R., & Edokpayi, J. N. (2024). The application of synthesized geopolymer for the removal of cationic dye from industrial wastewater. *Results in Materials*, 22, 100572. <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2024.100572>
- Xiang, Y., Hou, L., Liu, J., Li, J., Lu, Z., & Niu, Y. (2021). Adsorption and enrichment of simulated ¹³⁷Cs in geopolymer foams. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(4), 105733.

<https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105733>

- Yang, S., He, Y., Xue, G., Yu, H., & Cui, X. (2020). Fabrication of geopolymer microspheres and their Pb(II) adsorption performance by fixed-bed column method. *Desalination and Water Treatment*, 207, 300–308. <https://doi.org/10.5004/dwt.2020.26433>
- Yu, S., Pang, H., Huang, S., Tang, H., Wang, S., Qiu, M., Chen, Z., Yang, H., Song, G., Fu, D., Hu, B., & Wang, X. (2021). Recent advances in metal-organic framework membranes for water treatment: A review. *Science of The Total Environment*, 800, 149662. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149662>
- Yu, Z., Song, W., Li, J., & Li, Q. (2020). Improved simultaneous adsorption of Cu(II) and Cr(VI) of organic modified metakaolin-based geopolymer. *Arabian Journal of Chemistry*, 13(3), 4811–4823. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2020.01.001>
- Zhang, Y. J., Kang, L., & Liu, L. C. (2015). Alkali-activated cements for photocatalytic degradation of organic dyes. En *Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes* (pp. 729–775). Elsevier. <https://doi.org/10.1533/9781782422884.5.729>
- Zhang, Y. J., Liu, L. C., Xu, Y., Wang, Y. C., & Xu, D. L. (2012). A new alkali-activated steel slag-based cementitious material for photocatalytic degradation of organic pollutant from wastewater. *Journal of Hazardous Materials*, 209–210, 146–150. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.01.001>
- Zhang, Y., & Liu, L. (2013). Fly ash-based geopolymer as a novel photocatalyst for degradation of dye from wastewater. *Particuology*, 11(3), 353–358. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2012.10.007>