

GEOPOLÍMEROS PARA LA OBTENCIÓN DE AGUAS LIMPIAS

Maritza Adilene Montañez Cervantes ^{a,*}, Agustín Jaime Castro Montoya ^a

^a Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería Química, Edificio M, Gral. Francisco J. Múgica s/n, Felicitas del Río, 58070 Morelia, Michoacán México.

1216359g@umich.mx

Resumen

El agua es un elemento esencial para el adecuado funcionamiento de los ecosistemas y la supervivencia de todos los seres vivos. Este recurso natural cubre aproximadamente el 75 % de la superficie terrestre; no obstante, solo alrededor del 0.26 % se encuentra disponible de forma accesible y es apta para el consumo humano. A pesar de que el agua es un recurso limitado, su demanda ha aumentado a un ritmo insostenible y, en muchos casos, su uso irresponsable ha generado un grave problema de contaminación. En este artículo, exploramos el uso de geopolímeros para el tratamiento de aguas residuales como una solución innovadora para abordar este grave problema. Estos materiales se obtienen a partir de compuestos denominados aluminosilicatos (óxidos de aluminio y óxidos de silicio) que, al activarse mediante agentes alcalinos, dan lugar a una estructura rígida y porosa, con la capacidad de captar y remover diversos contaminantes presentes en el agua, como colorantes, metales pesados y otros compuestos tóxicos. La aplicación de los geopolímeros no solo ofrece una alternativa eficaz para mitigar los efectos negativos asociados con la contaminación hídrica, sino que también abren nuevas oportunidades para el desarrollo de tecnologías limpias y responsables.

Palabras clave: Geopolímeros; contaminación hídrica; remoción de contaminantes; colorantes y metales pesados.

GEOPOLYMERS TO OBTAIN CLEAN WATER

Abstract

Water is essential for the proper functioning of ecosystems and the survival of all living organisms. This natural resource covers approximately 75% of the planet's surface; however, only about 0.26% is readily accessible and suitable for human consumption. Despite being a limited resource, the demand for water has increased at an unsustainable rate, and in many cases, it is irresponsible use has generated a serious pollution problem. In this article, we examine the application of geopolymers for wastewater treatment as a novel solution to address this pressing issue. These materials are obtained from compounds known as aluminosilicates (aluminum oxides and silicon oxides), which, when activated by alkaline agents, give rise to a rigid, porous structure capable of capturing and removing various contaminants present in water, such as dyes, heavy metals, and other toxic substances. The application of geopolymers not only offers an effective alternative to mitigate the negative effects associated with water pollution but also opens new opportunities for the development of clean and responsible technologies.

Keywords: Geopolymers; water pollution; contaminant removal; dyes and heavy metals.

1. Introducción

El agua es un recurso vital para la vida en el planeta Tierra; no obstante, la contaminación hídrica se ha convertido en un problema ambiental de escala global. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), la contaminación del agua se define como el fenómeno en el que su composición se altera de tal manera que ya no puede utilizarse para lo que fue destinada (Rodríguez, 2010).

Frente a esta problemática, se explora el uso de geopolímeros como una alternativa sostenible e innovadora para el tratamiento de aguas contaminadas. Estos materiales ofrecen importantes ventajas, como una notable resistencia mecánica, térmica y química. Su producción es sostenible, ya que pueden ser producidos a partir de residuos industriales, lo que contribuye a la economía circular. Además, su fabricación y uso generan un bajo impacto ambiental debido al reducido requerimiento energético y a la emisión de bajas cantidades de dióxido de carbono (CO₂). Así mismo, los geopolímeros poseen la capacidad de adsorber y eliminar contaminantes presentes en aguas residuales y potables (Torres-Carrasco y Puertas, 2017; Sotelo-Piña y col., 2019).

A lo largo del documento se abordan, en primer lugar, los fundamentos y la problemática de la contaminación del agua; posteriormente, se profundiza en la naturaleza, producción y propiedades de los geopolímeros, así como en las diversas fuentes de obtención de sus componentes. Finalmente, se analiza la capacidad de estos materiales para remover contaminantes como metales pesados, colorantes y compuestos tóxicos mediante procesos como la adsorción y la fotodegradación, destacando su potencial como solución eficiente y ambientalmente responsable.

2. Problemática de la contaminación del agua

El agua es la sustancia líquida más abundante y utilizada en el planeta tierra. Este recurso natural cubre aproximadamente el 75 % de la superficie terrestre; sin embargo, solo alrededor del 2.5 % corresponde a agua dulce. De este porcentaje, únicamente el 0.26 % se encuentra en lagos y ríos, lo que lo hace fácilmente accesible para los seres humanos, mientras que el resto se encuentra atrapado en glaciares y casquetes polares (Mazari Hiriart, s. f.).

El agua desempeña un papel fundamental en los ecosistemas y en la supervivencia de los seres vivos (United Nations, s. f.). Su versatilidad se manifiesta en múltiples aplicaciones; entre las principales destacan su uso en la agricultura, la industria, el abastecimiento público y la producción de energía eléctrica. Sin embargo, este recurso enfrenta un grave problema de contaminación.

El crecimiento poblacional e industrial son las principales causas de la contaminación del agua (Orozco Lab, 2025). Este fenómeno ocurre cuando agentes nocivos -ya sean físicos, químicos o biológicos- son vertidos en los depósitos que albergan agua, como los cuerpos acuíferos, ríos, lagos y mares, alterando sus propiedades y disminuyendo su calidad, haciéndola inadecuada para su consumo y uso.

Una de las manifestaciones más evidentes de la contaminación del agua son las aguas residuales, que, al no ser tratadas de manera adecuada, se convierte una de las principales fuentes de deterioro ambiental.

Entre los principales contaminantes del agua se encuentran los desechos fecales, que albergan microorganismos patógenos (bacterias, virus y protozoos); desechos sólidos (basura, productos químicos y agrotóxicos generados por actividades humanas como la industria y la ganadería); sustancias químicas inorgánicas (sales, ácidos y metales pesados); nutrientes vegetales inorgánicos (nitratos y fosfatos); compuestos orgánicos (plásticos, microplásticos, plaguicidas y petróleo); sustancias radioactivas resultantes de plantas nucleares; desechos industriales; antibióticos y fármacos; sedimentos y minerales como la ceniza volcánica; y contaminantes térmicos (aumento de la temperatura en el agua) que provocan la transformación e incluso la muerte de los ecosistemas (US EPA, 2020; Rodríguez, J. P. 2010; Editorial Etecé, 2025; Fundación Aquae, 2021). En la Figura 1 se muestran los principales contaminantes que pueden estar presentes en el agua.



Figura 1. Principales contaminantes presentes en el agua.

La contaminación del agua tiene consecuencias severas; las más significativas son la escasez de agua potable, los problemas de salud pública y la destrucción de ecosistemas. En respuesta a la necesidad urgente de mitigar la contaminación y su impacto ambiental, la ciencia ha promovido la búsqueda de alternativas sostenibles y eficientes para la remediación de los cuerpos hídricos contaminados. Una de las más prometedoras es el uso de geopolímeros; pero ¿Qué son los geopolímeros?

3. Los geopolímeros

Los geopolímeros son polímeros inorgánicos formados a partir de aluminosilicatos, es decir, compuestos minerales ricos en óxido de silicio (sílice) y óxido de aluminio. Estos materiales se activan mediante agentes alcalinos, como hidróxido de sodio o potasio,

silicato de sodio o potasio, o una combinación de estos.

Los aluminosilicatos empleados para la elaboración de geopolímeros pueden obtenerse a partir de diversas fuentes, muchas de ellas provenientes de residuos industriales. Entre las más comunes se encuentran las cenizas volantes, el metacaolín y la escoria granulada de alto horno.

Las cenizas volantes, mostradas en la Figura 2, son subproductos finos provenientes de la combustión del carbón en centrales térmicas de generación eléctrica. Poseen características de actividad puzolánica, gracias a su alto contenido de óxido de sílice y óxido de aluminio. Se utilizan en la fabricación de geopolímeros, además, ayuda a mejorar la resistencia, trabajabilidad y durabilidad del hormigón (Sanchez, 1991).

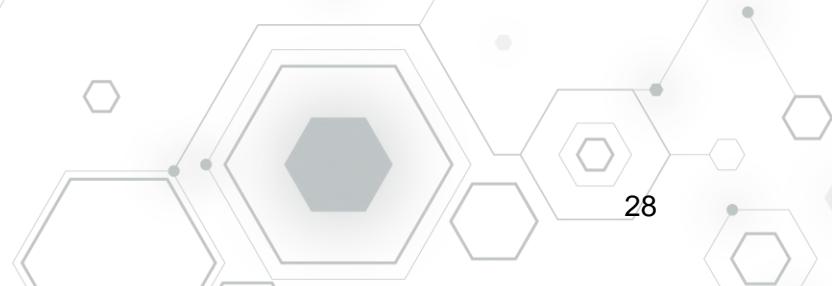




Figura 2: Cenizas volantes (Las Propiedades de las Cenizas Volantes, 2023).

El metacaolín es un material obtenido a partir de la calcinación del caolín a temperaturas entre 500 y 600 °C (Gutiérrez y col., 2006). El caolín, es un mineral blanco, se encuentra presente en diversos yacimientos naturales, siendo México uno de los principales productores. Las entidades productoras en México son: Chihuahua, Michoacán, Veracruz, Guanajuato, Jalisco, Hidalgo, Puebla y Zacatecas. En la Figura 3 se observa un yacimiento de caolín del depósito “Los Azufres”, ubicado en el municipio de Zinapécuaro, estado de Michoacán. Este mineral es ampliamente utilizado en la industria del papel, cerámica, de pinturas, farmacéutica, cosmética y de la construcción. (Secretaría de Economía, 2017).



Figura 3: Yacimiento de caolín “Los Azufres”, Michoacán, México.

Por su parte, la escoria granulada de alto horno, representada en la Figura 4, es un subproducto de la industria metalmecánica. Se obtiene al enfriar rápidamente la escoria proveniente del proceso de fundición del hierro. Esta presenta propiedades cementantes, por lo que es comúnmente utilizada para mejorar la durabilidad del hormigón.



Figura 4: Depósito de escoria granulada de alto horno.

La producción de geopolímeros capaces de captar y remover los contaminantes del agua consiste en el mezclado mecánico de los aluminosilicatos con un activador alcalino y

agua, hasta obtener una mezcla homogénea, la cual se logra en un tiempo aproximado de 10 a 15 minutos. Esta mezcla se transfiere a un molde y se cubre con una película de plástico (film) para evitar la pérdida de agua por evaporación. Posteriormente, se introduce a una estufa de secado durante 24 horas a 60 °C para lograr un material sólido.

Una vez formado, el geopolímero se lava con agua destilada hasta que el líquido de enjuague alcanza un pH neutro (pH = 7), con el fin de estabilizar el pH del material. Finalmente, se seca en una estufa de secado a una temperatura no mayor a 100 °C. En la Figura 5 se muestra un diagrama esquemático del proceso de elaboración de los geopolímeros.



Figura 5: Proceso de elaboración de los geopolímeros.

La materia prima utilizada en la fabricación de los geopolímeros es de crucial importancia, ya que el contenido de silicio y aluminio en los aluminosilicatos y el tipo de activador alcalino influyen directamente en sus propiedades físicas, químicas, mecánicas y microestructurales. Un alto contenido de óxidos afecta significativamente la porosidad y reactividad del material (Chen y col., 2024). Estos aspectos resultan fundamentales cuando se emplean geopolímeros para el tratamiento de agua contaminada. Por ejemplo, si el material presenta una estructura porosa bien distribuida, puede adsorber o

atrapar con mayor facilidad metales pesados y otros contaminantes. De este modo, una adecuada selección de la materia prima no solo mejora la calidad del geopolímero, sino también su capacidad para limpiar el agua de forma más eficiente.

3.1 Capacidad de los geopolímeros para remover los contaminantes del agua.

Entre las principales aplicaciones de los geopolímeros destacan su participación en la industria de la construcción sostenible, al reemplazar parcial o totalmente al cemento

Portland, proporcionando concreto geopolimérico. Además, los geopolímeros pueden ser empleados en el tratamiento de aguas residuales gracias a su capacidad para absorber ciertos contaminantes. Estos materiales presentan buenas propiedades para la inmovilización, encapsulación, fotodegradación y adsorción de contaminantes presentes en el agua, principalmente colorantes, metales pesados y otros contaminantes peligrosos.

Los geopolímeros han demostrado ser útiles para la adsorción de metales pesados como plomo, mercurio y cadmio. La técnica de adsorción, que se esquematiza en la Figura 6, es una de las más eficientes para la remoción de contaminantes. En este proceso, una sustancia (adsorbato) se adhiere a la superficie de un material (adsorbente), creando una película delgada que cubre la superficie externa del material. En este caso, los contaminantes presentes en el agua (adsorbatos) se adhieren a la superficie del geopolímero (adsorbente), quedando atrapados e inmovilizados en la estructura del material, lo cual contribuye a su eliminación.

Los geopolímeros pueden presentar procesos de adsorción física (fisisorción) o química (quimisorción). En la fisisorción, los contaminantes y metales pesados quedan

retenidos mediante interacciones débiles, generalmente fuerzas de Van der Waals. En la quimisorción, las interacciones son fuertes, en este proceso se llevan a cabo reacciones químicas entre el adsorbato y el adsorbente, lo que provoca la formación enlaces químicos, resultando en una mejora en la retención de los contaminantes (Alouani y col., 2021; Sánchez, L.Y, 2014).

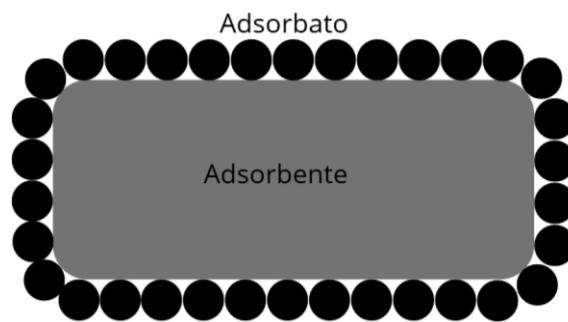


Figura 2: Proceso de adsorción.

Además, los geopolímeros pueden ser utilizados como filtros para retener algunas partículas. Esto se logra gracias a la porosidad en su estructura, la cual puede ser modificada durante su proceso de fabricación, aumentando así su efectividad y versatilidad.

Finalmente, se ha explorado la capacidad de los geopolímeros para descomponer algunos contaminantes orgánicos mediante la fotodegradación. Esta se lleva a cabo por medio de reacciones químicas generadas a partir de la acción de la luz (generalmente solar). En este proceso, se produce la ruptura

de los enlaces químicos de los contaminantes, generando moléculas más pequeñas, menos complejas e incluso inocuas.

La fotodegradación es altamente efectiva para tratar colorantes disueltos en el agua, como el azul de metileno, ayudando a minimizar la formación de subproductos tóxicos provenientes del uso de este tipo de colorantes. Adicionalmente, se ha demostrado que este proceso puede provocar la inactividad y eliminación de microorganismos patógenos en el agua, contribuyendo a su desinfección y purificación (Garcés, y col, 2006).

4. Conclusiones

La investigación acerca del uso de geopolímeros para el tratamiento de agua contaminada es aún reciente, pero gracias a sus propiedades, este tipo de materiales representan una alternativa prometedora para reducir el impacto ambiental generado en los depósitos de agua.

El estudio de los geopolímeros para aplicaciones de limpieza del agua puede ser mejorado mediante modificaciones en su composición química, lo que los convierte en una herramienta valiosa e innovadora para

ayudar a mitigar la contaminación de los cuerpos hídricos.

Referencias bibliográficas

Alouani, M. E., Saafi, 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>

US EPA. (2020). *Amenazas toxicológicas del plástico*.

https://19january2021snapshot.epa.gov/espanol/amenazas-toxicologicas-del-plastico_.html

Chen, K., Liu, Q., Chen, B., Zhang, S., Ferrara, L., & Li, W. (2024). Effect of raw materials on the performance of 3D printing geopolymer: A review. *Journal Of Building Engineering*, 84, 108501.

<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108501>

Orozco Lab. (2025) *¿Cómo se produce la contaminación del agua en el siglo XXI?*
<https://www.orozcolab.info/como-se->

[produce la contaminación del agua en el siglo xxi](https://www.comoves.unam.mx/numeros/articulo/54/el-agua-como-recurso)

Editorial Etecé. Enclopedia Concepto. (2021). *Contaminación del Agua - Concepto, causas y consecuencias*. <https://concepto.de/contaminacion-del-agua/>

Fundación Aquae. (2021). *Contaminación del agua: principales causas* - Fundación Aquae.

<https://www.fundacionaqua.org/agua-y-contaminacion/>

Garcés Giraldo, L. F, Hernández Ángel, M. L., Peñuela Mesa, G. A., Rodríguez Restrepo, A., & Salazar Palacio, J. A. (2012). Fotodegradación sensibilizada con TiO₂ del colorante rojo recoltive utilizando lámpara de luz UV. *Producción + limpia*, 1(1), 56-62. https://www.researchgate.net/publication/277034448_Fotodegradacion_sensibilizada_con_TiO2_del_colorante_rojo_recoltive_utilizando_lampara_de_luz_UV

Daswell. (2023). *Las propiedades de las cenizas volantes*. <https://daswell.com/es/blogs/fly-ash-properties-source-advantages-uses/>

Mazari Hiriart, M. (s. f.). *El agua como recurso*. Revista ¿Cómo ves? - Divulgación de la Ciencia, UNAM. Revista ¿Cómo Ves?

<https://www.comoves.unam.mx/numeros/articulo/54/el-agua-como-recurso>

Restrepo Gutiérrez, J. C., Restrepo Baena, O. J., & Tobón, J. I. (2006). *Efectos de la adición de metacaolín en el cemento Portland*. DYNA, 73(150), 131-141. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4599140.pdf>

Rodríguez, J. P. (2010). *Contaminación del agua. Contaminación ambiental en Colombia*. Bogotá: Fundación en causa por el desarrollo humano. 255-300.

Sanchez, V. (1991). *Determinación de las características físico-mecánicas de un concreto de alta resistencia de $fc= 500$ kg/cm² con adición de ceniza volante* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Cajamarca].

https://repositorio.unc.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14074/1991/TESIS_VICTOR_SANCHEZ_VILLEGRAS.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Sánchez, L.Y. (2014). *Estudio de procesos de separación de CO₂ y CH₄ mediante el empleo de zeolitas*. [Tesis de Máster, Universidad Politécnica de València]. <http://hdl.handle.net/10251/56141>

Secretaría de Economía [Subsecretaría de Minería]. (2017). *Perfil De Mercado Del Caolín. Dirección General De Desarrollo Minero.*

https://www.gob.mx/cms/uploads/attachmen/t/file/287794/Perfil_Caolin_2017.pdf

Sotelo-Piña, C., Aguilera-González, E.N., Martínez-Luévanos, A. (2019).

Geopolímeros: pasado, presente y futuro de los ecomateriales de baja huella de carbono.

Manual de Ecomateriales. Springer, Cham.

https://doi.org/10.1007/978-3-319-68255-6_54

Torres-Carrasco, M., & Puertas, F. (2017). La activación alcalina de diferentes aluminosilicatos como una alternativa al Cemento Portland: cementos activados alcalinamente o geopolímeros. *Revista de Ingeniería de Construcción*, 32(2), 05-12.

<https://doi.org/10.4067/s0718-50732017000200001>

United Nations. (s. f.). *Agua / Naciones Unidas.* <https://www.un.org/es/global-issues/water>