

Remoción de arsénico en agua con zeolitas naturales provenientes del norte y centro de México

Arsenic removal in water with natural zeolites from northern and
central Mexico

Luis Humberto Colmenero-Sujo¹, María de Lourdes Villalba^{2*}

¹ Instituto Tecnológico de México. Instituto Tecnológico de Chihuahua II. Av. de las Industrias 11101, Complejo Industrial Chihuahua, 31130 Chihuahua, Chih.

² Universidad Autónoma de Chihuahua, Facultad de Ingeniería. Circuito Número I s/n, Nuevo Campus Universitario, Nte. 2, 31125 Chihuahua

*Correspondencia: mvillalb@uach.mx (María de Lourdes Villalba)

DOI: <https://doi.org/10.54167/tch.v17i3.1261>

Recibido: 19 de junio de 2023; Aceptado: 05 de septiembre de 2023

Publicado por la Universidad Autónoma de Chihuahua, a través de la Dirección de Investigación y Posgrado

Editora de Sección: Dra. Alicia Melgoza Castillo

Resumen

Adsorción e intercambio iónico son consideradas como las técnicas efectivas y factibles para remover metales pesados del agua. Investigaciones recientes han reportado el uso de zeolitas para remover arsénico del agua. En México se han identificado grandes yacimientos de este mineral, tanto en el norte, centro y sur del país, con diferencias importantes debido al ambiente geológico e influencia ambiental donde se encuentran. El objetivo fue conocer la remoción de arsénico en agua que presentan las zeolitas naturales provenientes del norte y centro de México. Se seleccionaron dos yacimientos uno en el estado de Chihuahua (MACH) y otro en el estado de Guanajuato (MSF). Se caracterizaron geológica, física y químicamente mediante diferentes técnicas: petrografía (láminas delgadas), difracción de rayos X (DRX) y microscopía electrónica de barrido (MEB). Se realizaron isotermas de adsorción, cinética de adsorción, finalmente se midió la capacidad de adsorción mediante columnas empacadas. Los minerales presentaron diferente composición (tipo y proporción de zeolitas), así como la relación Si/Al. Las pruebas de isotermas de adsorción, cinética de adsorción y columnas empacadas demostraron la capacidad de remoción de cada material, siendo la zeolita proveniente del centro de México que ofrece mayor retención por intercambio iónico.

Palabras clave: contaminación, adsorción, intercambio iónico.

Abstract

Adsorption and ion exchange are considered to be the most effective and feasible techniques for removing heavy metals from water. Recent research has reported the use of zeolites to remove arsenic from water. In Mexico, large deposits of this mineral have been identified in the north, center and south of the country, with important differences due to the geological setting and environmental influence where they are found. The objective was to know the arsenic removal in water of natural zeolites from northern and central Mexico. Two deposits were selected, one in the state of Chihuahua (MACH) and the other in the state of Guanajuato (MSF). They were characterized geologically, physically and chemically by different techniques: petrography (thin films), X-ray diffraction (XRD) and scanning microscopy (SEM). Adsorption isotherms, adsorption kinetics and finally the adsorption capacity was measured using packed columns. The minerals presented different composition (type and proportion of zeolites), as well as the Si/Al ratio. The adsorption isotherm tests, adsorption kinetics and packed columns demonstrated the removal capacity of each material, with the zeolite from central Mexico offering the highest retention by ion exchange.

Keywords: pollution, adsorption, ion exchange

1. Introducción

Adsorción e intercambio iónico han sido consideradas como técnicas efectivas y factibles para la eliminación de metales pesados. La adsorción permite la concentración de una o más especies en la superficie de otra, ya sea en fase sólida o líquida (Prato *et al.* 2021), tal es el caso del paso del agua a través del contacto con un lecho en los cuales los metales pesados son removidos por una serie de reacciones superficiales (Kyoziol-Komosinska *et al.* 2015). En tanto que la remoción por intercambio iónico se lleva a cabo mediante materiales insolubles y de textura porosos que contienen grupos reactivos asociados a iones lábiles capaces de intercambiarse con el medio que los rodea, se basa en los equilibrios de reparto de los iones de las mezclas entre el material adsorbente y la disolución (Pabón *et al.* 2020; Bilbao-Chávez *et al.* 2019). Las zeolitas son minerales cristalinos de aluminosilicatos que presentan éstas y otras características que las hacen un material prometedor para la remoción de iones de metales pesados en agua. Es un sólido, inorgánico y poroso, con una estructura tetraédrica, su centro está ocupado por un átomo de silicio (Si) o aluminio (Al) con cuatro átomos de oxígenos en los vértices, provocando una carga negativa en la estructura, esta carga es compensada por cationes metálicos. En sus canales y cavidades se encuentran moléculas de agua y cationes (Na^+ , K^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2}) que permite el intercambio de iones y procesos de deshidratación (De la Vega *et al.* 2018). Su área superficial y volúmenes de poro le proporcionan una elevada capacidad de adsorción (Moliner *et al.* 2015). Parámetros como la temperatura ambiental, valencia iónica, concentración de electrolitos, tamaño y forma de iones influye en el intercambio catiónico y afinidad de las zeolitas naturales con ciertos metales pesados (Velarde *et al.* 2023).

Investigaciones recientes han reportado el uso de zeolitas naturales para la remoción de arsénico en agua (González-Chávez *et al.* 2023). La existencia de este material depende del ambiente geológico, las elevadas temperaturas causadas por el gradiente geotérmico (magmáticas o primarias), metamorfismo, hidrotermal de contacto y por diagénesis, superficies influenciadas por gradientes químicos (filtración de agua, meteorización y depósitos salinos de lago y alcalinos), bajas

temperaturas en ambientes marinos y las que se forman en cráteres de impacto (<https://geologiaweb.com/minerales/zeolitas/2020>).

En México se han identificado yacimientos de zeolitas formados en depósitos con afinidad sedimentaria y otros con carácter ígneo en 17 estados distribuidos en el norte, centro y sur del país (Paredes *et al.* 2013; Chávez-Aguirre *et al.* 2019). En el norte, el estado de Chihuahua cuenta con zonas volcánicas donde existen volúmenes grandes de zeolitas del tipo clinoptilolita, illitamonmorillonita, cristobalita y heulandita (Novo y Castrafreda, 2018). En el Municipio de Aldama existe yacimientos de minerales no metálicos que tiene amplias perspectivas de ser considerados como una de las principales fuentes de desarrollo minero, donde se ubica una gran cantidad de material zeolítico de mediana y alta calidad (SMG, 2006). En el centro, el estado de Guanajuato también es reconocido por su riqueza mineral tanto metálico como no metálico, y donde se ha encontrado diversas especies de zeolitas (CRM, 2004). En el municipio de San Felipe, Guanajuato, existe un reconocido yacimiento con formaciones zeolitizadas producto de rocas ácidas que originalmente esas tobas riolíticas sufrieron alteración hidrotermal (<http://sde.guanajuato.gob.mx>, 2009).

Existen diversas técnicas para remover arsénico del agua como la coagulación, osmosis inversa, precipitación, adsorción e intercambio iónico. Sin embargo, la mayoría de ellas presentan desventajas como producción de lodos y altos costos (Pabón *et al.* 2020). Las zeolitas naturales por su parte han resultado ser una alternativa, viable y económica por su capacidad de adsorción e intercambio iónico, abundancia y bajo costo de extracción.

El objetivo fue conocer la eficiencia de la remoción de arsénico en agua que presentan las zeolitas naturales del norte y centro de México mediante la evaluación de isothermas de adsorción, cinética de adsorción y medición de la capacidad de adsorción por columnas empacadas, así como también conocer sus características geológicas, física y química por diferentes técnicas: petrografía (láminas delgadas), difracción de rayos X (DRX) y microscopía electrónica de barrido (MEB).

2. Materiales y métodos

2.1. Yacimientos zeolíticos norte y centro de México

El muestreo de zeolita natural se llevó a cabo en los Municipios de Aldama, Chihuahua (MACH) en el yacimiento ubicado en el Rancho La Otra Banda UTM 412135 m E 3187269 m N y en San Felipe, Guanajuato (MSF) en el yacimiento ubicado UTM 282097 m E, 2399946 m N (Fig 1).

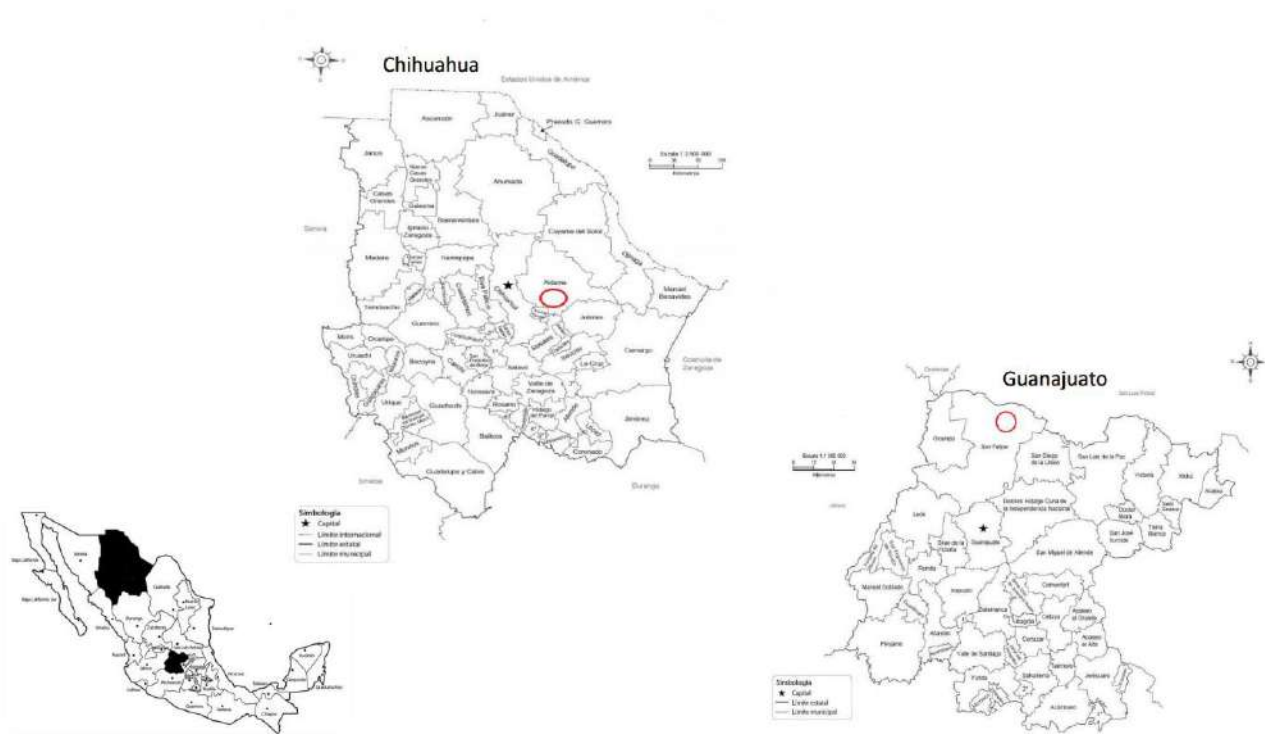


Figura 1. Ubicación de los yacimientos de zeolitas en los estados de Chihuahua y Guanajuato
Figure 1. Location of the zeolite deposits in the states of Chihuahua and Guanajuato.

2.2. Métodos

El tamaño de ambos materiales se redujo hasta un tamaño de grano de 1.7 a 0.6 mm (mallas #12 y # 30). Se saturó con agua destilada por un periodo de 24 horas para eliminar el polvo y la materia orgánica. Se retiró el exceso de agua y se secó en el horno por 72 horas a 100°C. Cada muestra se analizó su composición geológica mediante estudio petrográfico por la técnica de láminas delgadas utilizando un microscopio óptico de luz polarizada, estructura, distribución de poro, volumen y tamaños mediante un equipo de Difracción de Rayos X (DRX), marca Panalytical Modelo X' Pert PRO, Siemens D5000, operando a una radiación Cu-K α de 0.154 nm (monocromador de grafito) y con un equipo de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) marca JEOL 6010 Plus, modo de imagen de electrones secundarios y retrodispersionados. Ambos equipos pertenecientes al Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV) de Chihuahua.

2.4. Isotermas de adsorción

En 6 recipientes de vidrio se agregó un 1 g de zeolita con 35 ml de solución acuosa de As⁺⁵ a 30°C, la concentración de los recipientes varió de 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1.0 y 2.0 mg L⁻¹, se agitaron a 200 rpm durante 24 horas. Posteriormente se filtraron y se determinó la concentración final mediante un

equipo de Espectrometría Absorción Atómica marca Perkin Elmer Analyst 700. Este procedimiento se realizó para las zeolitas.

2.5. Cinética de adsorción

En 16 recipientes se colocó 35 ml de solución de As^{+5} con concentración de 0.025 mg L^{-1} , se dividieron en 4 grupos que se les agregó diferente cantidad de zeolita; al primer grupo se le añadió un 1 g al segundo 2 g, al tercero 3 g y finalmente al cuarto 4 g, se agitaron constantemente, cada grupo se retiró a diferentes tiempos 12, 24, 36 y 48 horas respectivamente. Este procedimiento se realizó para ambas zeolitas.

2.6. Columnas de Adsorción

Se utilizaron columnas de acrílico transparente con diámetro interno de 4 cm y una longitud de 50 cm. Se empaquetaron las columnas con 800 g de zeolitas de manera independiente realizándose 8 corridas por columna con una solución de 2.5 mg L^{-1} de As^{+5} . Se tomaron muestras al final de cada corrida, se filtraron y se determinó la concentración por Espectrometría de Absorción Atómica.

Cabe mencionar que las concentraciones de As de las evaluaciones de las isothermas de adsorción, cinética de adsorción y medición de la capacidad de adsorción por columnas empacadas se empleo el estándar As^{+5} de $1000 \pm 5 \text{ mg L}^{-1}$ marca Merck, cada procedimiento se realizo por duplicado para ambas zeolitas.

3. Resultados y discusión

3.1. Características geológica, física y química de las zeolitas

La petrografía mostró la diferencia entre las zeolitas, la del estado de Chihuahua fue de color blanco lechoso con minerales principales (cuarzo, plagioclasa, biotita, albita y montmorillonita) de origen volcánico (rocas ígneas extrusivas) y la del estado de Guanajuato presentó un color blanco lechoso con horizontes amarillos, minerales (cuarzo, plagioclasa, detrito riolítico y sideronatrita), génesis producto de transporte sedimentario. El patrón de DRX de la muestra MACH presentó una fase mineral mayormente de mizzonita cuya fórmula es $C_{0.83}Al_{5.32}Ca_{2.68}Cl_{0.02}K_{0.44}Mg_{0.12}Na_{0.76}O_{27.09}S_{0.15}Si_{6.68}$, y heulandita. En tanto que la de MSF presentó una fase mineral de zeolita tipo clinoptilolita-Ca, fórmula $Al_{1.2}Ca_{1.58}H_{30}O_{46.9}Si_{16.8}$. (Fig. 2).

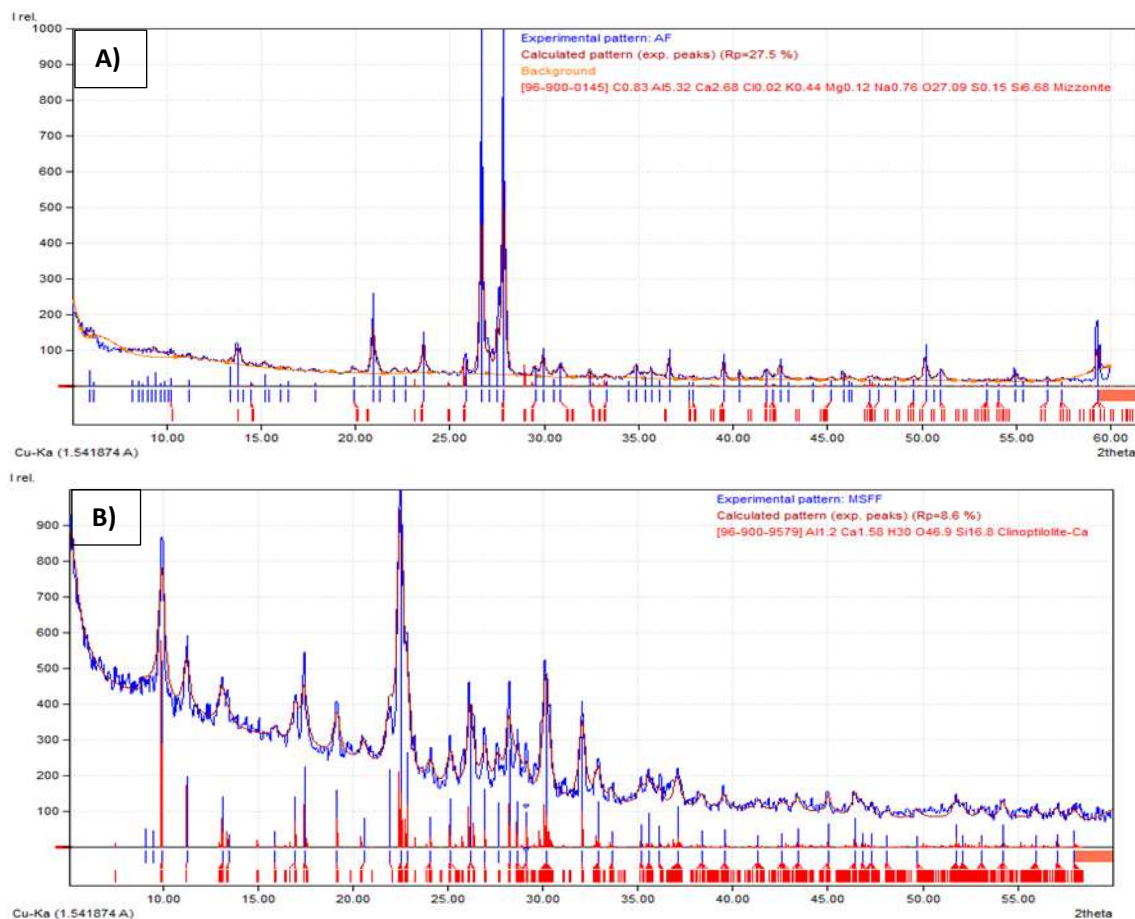


Figura 2. Difractogramas del material zeolítico de A) Aldama, Chihuahua (MACH) y B) San Felipe, Guanajuato (MSF).

Figure 2. Diffractograms of zeolitic material of A) Aldama, Chihuahua (MACH) and B) San Felipe, Guanajuato (MSF).

La composición en porcentaje de peso de los elementos presentes en cada material varió, MACH mostró un contenido de 51.9% de oxígeno (O), 37.3% de Silicio (Si) y 5.5% de Aluminio (Al), es un aluminosilicato conformado en su mayoría por los minerales mizzonita, plagioclasas, cuarzo, zeolita y caolín, con menor proporción de K, Ca, Fe, Mg y Na. MSF presenta altos porcentajes de 46.2% de O, 22.1% de Si y 9.3% de Al, mayormente conformado por zeolita clinoptilolita y un 2.2% de Ca por el tipo de zeolita cálcica. Adicionalmente posee elementos como K, Fe, Na y Mg presentes en los demás minerales que conforman el material. Las relaciones Si/Al de los materiales fue para MACH de 2.37 y para MSF de 6.78, el yacimiento del Municipio de Aldama contiene menos sitios activos.

3.2. Isotermas y cinética de adsorción

El proceso de adsorción de arsénico se adaptó al modelo de Freundlich por el coeficiente R^2 las zeolitas presentaron 0.9962 para MACH y 0.9999 para MSF ambas cercanas a 1 (Carbonel-Ramos, 2018). La (q_e) de MSF fue mayor comparada con la proveniente del estado de Chihuahua, en tanto que la constante $1/n$ en ambos materiales fue menor de 1 por lo que la adsorción ocurre con la formación de multicapas (**Tablas 1**).

Tabla 1. Parámetro promedio de la isoterma de Freundlich para la adsorción de As de los Municipios de Aldama (MACH) y San Felipe (MSF).

Table 1. Average parameter of the Freundlich isotherm for As adsorption from the municipalities of Aldama (MACH) and San Felipe (MSF).

Modelo Freundlich	MACH	MSF
q_e (mg/g)	0.0034	0.0053
Desv (q_e)	± 0.006	± 0.004
K	0.0056	0.0095
$1/n$	0.9478	0.9678
R^2	0.9962	0.9999

La zeolita MACH con 2, 3 y 4 g presentó concentraciones mayores a la inicial (0.025 mgL^{-1}) valores entre 0.033 a 0.064 mgL^{-1} , al incrementar la masa adsorbente y el tiempo de contacto (horas) se incrementó la concentración de As. El mineral de MSF al agregarse 3 y 4 g disminuyó la concentración original a 0.014 y 0.015 mgL^{-1} , con un 1g, el As permaneció igual a la concentración original, con 2 g aumento de 0.025 a 0.027 mgL^{-1} mostrando desorción. Al comparar ambos materiales MSF tiene una capacidad de adsorción (C/C_0) mayor que MACH, cuando la masa adsorbente es un 1 g y con el tiempo de contacto mayor a 30 horas (**Fig 3**).

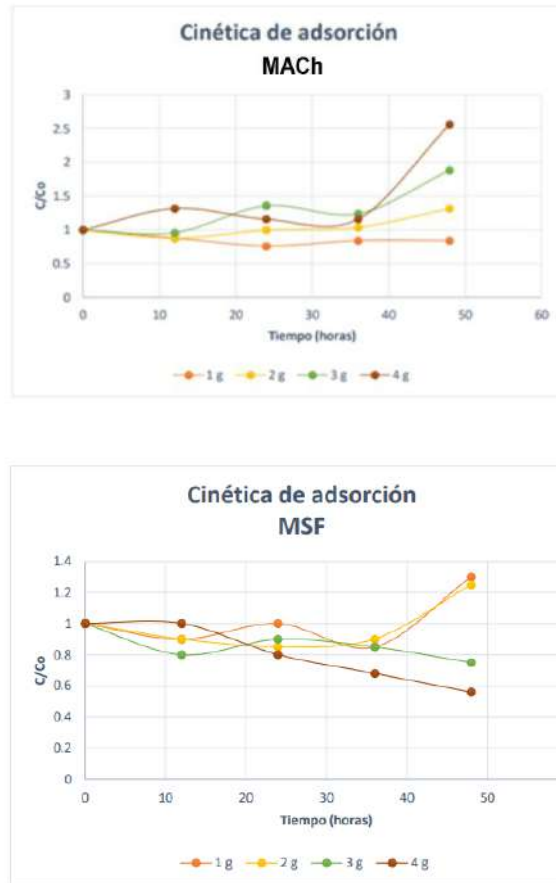


Figura 3. Cinética de adsorción de MACH y MSF
Figure 3. Adsorption kinetics MACH and MSF.

La remoción en la primera corrida que presentaron ambas zeolitas fue de 96 y 94% respectivamente, posteriormente los porcentajes de remoción variaron en cada corrida aumentando o disminuyendo la adsorción (**Tabla. 2**), esto por el ensamblaje de canales interconectados horizontal y verticalmente (Pérez-González, *et al.* 2020). El tiempo de contacto de la solución en la primera corrida fue aproximadamente de una semana ya que el tamaño de la zeolita no permitió la salida de la solución de manera inmediata. Una vez saturado los materiales disminuyeron los tiempos de contacto a un día. La remoción que presentaron los materiales está altamente ligados a la estructura cristalina tridimensional que posee cada tipo de zeolita. El intercambio dentro de las zeolitas es debido al desajuste en la carga de los tetraedros de la estructura, ésta es debido a la sustitución de algunos Si^{+4} por Al^{+3} siendo estos equilibrados por iones intercambiables.

Ambas zeolitas proceden de una población normal (**Fig. 4**), ya que se puede observar que los valores de distribución de probabilidad son mayores a (0.01). La zeolita MSF presenta una desviación estándar de 19.81, valor promedio de 51.18% de remoción, en tanto que la desviación estándar de

MACH fue de 31.20, valor promedio de 49.01%, lo que indica que el material que presenta mayor remoción de arsénico en agua es el del estado del centro de México. Sin embargo, se puede aumentar la capacidad de remoción de ambas zeolitas, Khatamian *et al.* (2023) modificaron la zeolita mediante el uso de nanocompuestos de Fe_3O_4 /zeolita y Fe_2O_3 /zeolita alcanzando porcentajes máximos de eliminación de arsénico del 95.39% y 98.52%, respectivamente. Es importante considerar también lo señalado por Janashvill & Akhalbedashvilli (2023) las propiedades de sorción del mineral dependen del tipo de tratamiento químico y térmico del pH, la concentración de la solución estándar y el grado de dispersión y sobre todo la forma iónica en que se encuentra presente el arsénico.

Tabla 2. Porcentaje de remoción de As de los Municipios de Aldama (MACH) y San Felipe (MSF)
Table 2. Percentage of As removal for the Municipalities of Aldama (MACH) and San Felipe (MSF)

Corridas	Co (ml L ⁻¹)	MACH (%R)	MSF (%R)
1	2.381	96.31	94.71
2	2.108	27.56	60.44
3	2.849	45.51	43.87
4	2.545	93.94	53.01
5	2.256	44.8	35.42
6	2.250	40.13	48.50
7	2.077	38.03	41.01
8	2.300	5.77	32.46

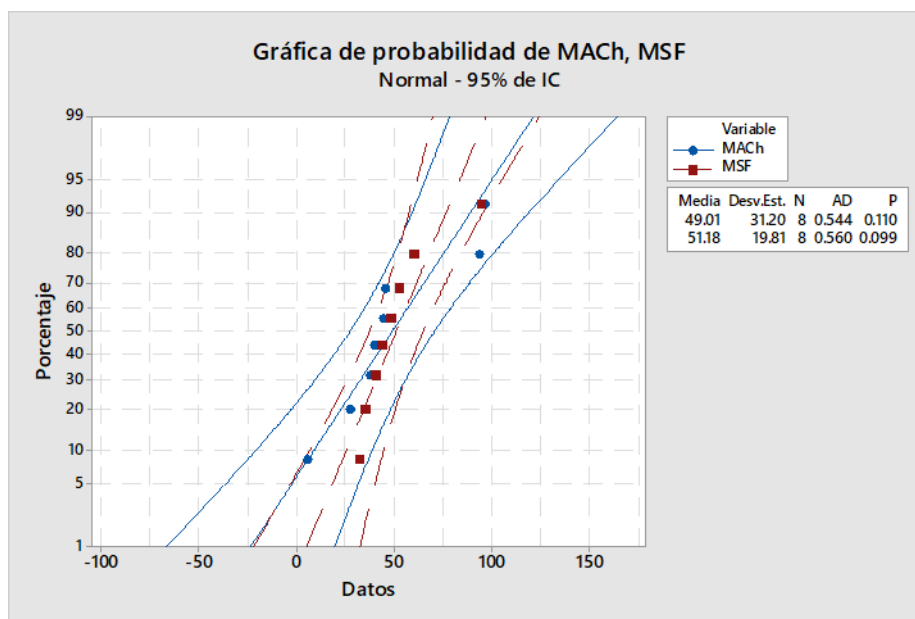


Figura 4. Gráfico de probabilidad de MACH y MSF.
Figure 4. Probability graph of MACH and MSF.

4. Conclusiones

Los minerales tuvieron diferentes características geológicas, la fase dominante para MSF fue la clinoptilolita-Ca, mientras que para MACH fue la mizzonita con cantidad reducida de heulandita. La relación de Si/Al varió de un material a otro para MACH fue de 6.78 y para MSF fue de 2.37, lo que refleja la capacidad mayor de MFS en intercambio iónico y adsorción, facilitando la remoción de arsénico. El análisis de las isotermas de adsorción se ajustó al modelo de Freundlich ambas muestras presentaron sitios infinitos adsorbentes con diferentes afinidades, iniciándose la adsorción en los sitios activos con mayor afinidad al catión As^{+5} del estándar. En cuanto a la cinética de adsorción, MACH mostró que a menor cantidad de material y menor tiempo mayor adsorción, al contrario de MSF que ha mayor cantidad de material y mayor tiempo es mayor porcentaje de remoción.

El material MACH aún que no contuvo importante cantidad de material zeolítico no presentó una diferencia considerable en el porcentaje de remoción con MSF. Por lo que los dos materiales provenientes del estado de Chihuahua y Guanajuato si remueven arsénico siendo factibles para dar un tratamiento previo al agua que contenga arsénico. Ambos porcentajes de remoción de los materiales se puede aumentar a través de un proceso de modificación.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo financiero a través de la Convocatoria Atención a Problemas Nacionales 2015. Proyecto de Investigación "Utilización de

zeolitas naturales mexicanas para la remoción de contaminantes en agua”, con clave de referencia 747.

Conflicto de interés

Los autores declaran que no existe conflictos de intereses en la publicación de estos resultados.

5. Referencias

- Bilbao-Chávez, M. C., Villalba, M.L., Flores-Zamora, M. I., Ochoa-Lara, M.T., Espinosa-Magaña, F., & Castañeda-Ávila, J. (2019). Utilización y Aplicación de Zeolitas Naturales; su importancia en México. Villalba y Rubio(ed.), pp. 1-15. Edición Universidad Autónoma de Chihuahua. ISBN:978-607-536-026-3
- Carbonel-Ramos, D. (2018). Adsorción de Cadmio, Cobre y Plomo en Bentonita, Caolín y Zeolita Naturales y Modificadas: Una Revisión de los Parámetros de Operación, Isotermas y Cinética. *Ingeniería*, 23(3), pp. 252-273. <https://doi.org/10.14483/23448393.13418>
- Chávez-Aguirre, R., Villalba, M.L., Álvarez-Olivares, W. D., Colmenero-Sujo, H.L., Bilbao-Chávez, M.C., De la Garza-Aguilar, R., Pinales-Munguía, A., Rubio-Arias, H., & Ochoa-Rivero, J. M. (2019). Utilización y Aplicación de Zeolitas Naturales; su importancia en México. Villalba y Rubio(ed.), pp. 1-15. Edición Universidad Autónoma de Chihuahua. ISBN:978-607-536-026-3
- Consejo de Recursos Mineros (CRM). Dirección de Minas de Guanajuato (2004). Inventario de Recursos mineros del estado de Guanajuato. <https://goo.su/E7k2rC>
- De la Vega, D., González, C., Escalante, C.A., Gallegos, J., Salamanca, M., & Manrique-Losada, L. (2018). Uso de zeolita faujasita para adsorción de iones en agua residual municipal. *Tecnología y Ciencias del Agua (IMTA)*. 9(4), pp. 185-208. <http://doi.org/10.24850/j-tyca-2018-04-08>
- González-Chávez, J. L., Chiken Soriano, A., Martín Romero, F., & Cenicerros-Gómez, A. E. (2023). Elucidación del mecanismo de remoción de arsénico en disolución acuosa con residuos metalúrgicos. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 39, 25-42, 2023 <https://doi.org/10.20937/RICA.54399>
- Informe Técnico de Reservas Probables del Yacimiento de Rocas Zeolíticas “San Felipe”. (2009). Comunidad estancia de San Francisco, Municipio de San Felipe, Gto. <http://sde.guanaguato.gob.mx>
- Janashvili, N., & Akhalbedashvili, L., (2023). Natural zeolite clinoptilolite as adsorbent for cleaning waters from arsenic ions. *Chemical Science. Sciences of Europe* # 110, (2023). <http://doi.org/10.5281/zenodo.7618214>
- Khatamian, M., Afshar No, N., Hosseini Nami, S., (2023). Synthesis and characterization of zeolite A, Fe₃O₄/zeolite A, and Fe₂O₃/zeolite A nanocomposites and investigation of their arsenic removal performance. *J IRAN CHEM SOC* 20, 1657–1670. <https://doi.org/10.1007/s13738-023-02787-w>
- Kyziol-Komosinska, J., Rosik-Dulewska, C., Franus, M., Antoszczyszyn-Szpicka, P., Czupiol, J., & Kryzewska, I. (2015). Sorption capacities of natural and synthetic zeolites for Cu (II) ions. *Polish Journal of Environmental Studies*, 24(3), 1111-1123. <http://doi.org/10.15244/pjoes/30923>

- Moliner, M., Martínez, C., & Corma, A. (2015). Multipore Zeolites: Syntheses and Catalytic Applications. *Angew Chem Int. Ed Engl.* 16; 54(12), pp.1360-79. <http://doi.org/10.1002/anie.201406344>
- Novo Fernández, R., & Costafreda Mustelier, J.L. (2018). Las zeolitas naturales de México. En "Las zeolitas naturales de Iberoamérica" Fundación Gómez Pardo, pp. 280-321. <https://oa.upm.es/50786/>
- Pabón, S.E., Benítez, R.A., & Gallo, J.A. (2020). Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnología de remoción. Una revisión. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 14(27), 9-18. <http://doi.org/10.31908/19098367.1734>
- Paredes, M.R., Ramírez, A.M., Osuma, E.S., & Gómez, C.B. (2013). Zeolita Natural (Alternativa ecológica y económica para la agricultura de temporada en México). ISBN:978-607-37-0014-6. <https://goo.su/jwkQTXN>
- Pérez-González, N, K., Legarreta-García, F., Díaz-Guzmán, D., Vargas-Ramírez, M., Reyes-Cruz, V., & Flores-Zamora, M. I. (2020). Determinación de las características Físico-Químicas de una Zeolita Natural. *Padi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingeniería del ICBI*, 8(Especial), 14-18. <https://doi.org/10.29057/icbi.v8iEspecial.6297>
- Prato, J. G., González-Ramírez, L. C., Pérez, M. C., Rodríguez, M. E., Prato, J. G., González Ramírez, L. C., Pérez, M. C., & Rodríguez, M. E. (2021). Adsorción de la dureza del agua sobre lechos de rocas volcánicas de Ecuador. *Información tecnológica*, 32(2), 51-60. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642021000200051>
- Servicio Geológico Mexicano (SGM), Fideicomiso de Fomento Minero. (2006). Inventario físico de los recursos minerales del área de Nombre de Dios, Chihuahua. <https://goo.su/SFwf5>
- Velarde, L., Nabavi, M, S., Escalera, E., Antti, M, L., & Akhtar, F. (2023). Adsorption of heavy metals on natural zeolites: A review. *Chemosphere*, 328(2023), 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138508>

2023 TECNOCENCIA CHIHUAHUA

Esta obra está bajo la Licencia Creative Commons Atribución No Comercial 4.0 Internacional.



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>