

## **Eliminación de metales pesados en agua utilizando filtros empacados con zeolita natural de diversos tamaños**

### **Eliminating heavy metals from water with filters packed with natural zeolite of varying sizes**

Héctor Osbaldo Rubio-Arias<sup>1</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0363-3407>

Jesús Manuel Ochoa-Rivero<sup>2</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0015-6593>

María de Lourdes Villalba<sup>3</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6545-5466>

Eutiquio Barrientos-Juárez<sup>4</sup>, <https://orcid.org/0000-0003-4816-4453>

Celia De-la-Mora-Orozco<sup>5</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3675-6569>

Beatriz Adriana Rocha-Gutiérrez<sup>6</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2991-3914>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma de Chihuahua, Facultad de Zootecnia y Ecología, Chihuahua, México, [h Rubioa@uach.mx](mailto:h Rubioa@uach.mx)

<sup>2</sup>Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental La Campana, Chihuahua, México, ochoa.jesus@inifap.gob.mx

<sup>3</sup>Universidad Autónoma de Chihuahua, Facultad de Ingeniería, Chihuahua, Mexico, mvillalb@uach.mx

<sup>4</sup>Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental La Campana, Chihuahua, México, barrientos.eutiquio@inifap.gob.mx

<sup>5</sup>Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Centro-Altos de Jalisco, Jalisco, México, delamora.celia@inifap.gob.mx

<sup>6</sup>Universidad Autónoma de Chihuahua, Facultad de Ciencias Químicas, Chihuahua, México, brocha@uach.mx

Autor para correspondencia: Jesús Manuel Ochoa-Rivero, ochoa.jesus@inifap.gob.mx

## Resumen

La zeolita se ha utilizado de forma efectiva para la adsorción de iones en agua contaminada. El objetivo fue evaluar la remoción de metales pesados en agua utilizando filtros empacados con una zeolita natural de diferente granulometría. Se evaluaron cuatro tratamientos: 70 mm (T1-grande), 30 mm (T2-mediano), 500  $\mu\text{m}$  (T3-chico) y una combinación (T4-mixto). La concentración de Ag, Al, As, Au, B, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Co,

Cr, Cu, Fe, Hg, K, Li, Mg, Mo, Na, Ni, P, Pb, Sb, Se, Sn, Sr, Tu, Ti, Tl, V, W y Zn fue medida en agua cruda (AC), la cual se empleó para descontaminación. Los parámetros de pH, CE y SDT también se evaluaron. El AC se filtró tres veces y se utilizaron dos repeticiones. El análisis estadístico se llevó a cabo con un arreglo de tratamientos factorial  $4 \times 3$ , donde el factor A fue el tamaño de granulometría de zeolita (T1, T2, T3 y T4) y el factor B fue el número de filtraciones (1, 2 y 3). La zeolita fue una heulandita ( $\text{CaAl}_2\text{Si}_7\text{O}_{18} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) con 61.43 % de pureza. El AC contenía concentraciones de As ( $0.189 \text{ mg l}^{-1}$ ); B ( $1.339 \text{ mg l}^{-1}$ ); Ca ( $23.90 \text{ mg l}^{-1}$ ); Li ( $0.408 \text{ mg l}^{-1}$ ); K ( $20.09 \text{ mg l}^{-1}$ ); Mg ( $18.17 \text{ mg l}^{-1}$ ), y Na ( $452.18 \text{ mg l}^{-1}$ ). Los cuatro tratamientos fueron eficientes en la remoción, pero los tratamientos T3-chico (As = 48 %; B = 73 %; Li = 82 %; Na = 36 %) y T4-mixto (As = 42 %; B = 72 %; Ca = 21 %; Li = 84 %; Na = 65 %; Mg = 86 %) fueron los mejores. Se concluye que la zeolita puede ser eficiente para la remoción de metales en agua.

**Palabras clave:** descontaminación de agua, mineral, metales, filtración, zeolita natural.

### Abstract

The zeolite has been used effectively to adsorb harmful ions in contaminated water. The objective was to evaluate the removal of heavy metals from water using a filter packed with natural zeolites of different particle sizes. Four treatments were evaluated: 70 mm (T1-large), 30 mm (T2-medium),  $500 \mu\text{m}$  (T3-small), and a combination (T4-mixed). The zeolite was characterized at the laboratory of the Mexican Geological

Service (MGS). Concentrations of Ag, Al, As, Au, B, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, K, Li, Mg, Mo, Na, Ni, P, Pb, Sb, Se, Sn, Sr, Tu, Ti, Tl, V, W, and Zn were quantified from influent water (IW) and used for decontamination. In addition, the parameters of pH, EC, and TDS were estimated. The IW was filtered three times with two replicates. The statistical analysis was performed using a factorial arrangement of treatments 4×3; where Factor A was particle size (T1, T2, T3, and T4) and Factor B was several times through the filters (once, twice, and three). The zeolite was a heulandite type ( $\text{CaAl}_2\text{Si}_7\text{O}_{18}\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) with 61.43 % purity. The IW contained concentrations of As ( $0.189 \text{ mg l}^{-1}$ ); B ( $1.339 \text{ mg l}^{-1}$ ); Ca ( $23.90 \text{ mg l}^{-1}$ ); Li ( $0.408 \text{ mg l}^{-1}$ ); K ( $20.09 \text{ mg l}^{-1}$ ); Mg ( $18.17 \text{ mg l}^{-1}$ ), and Na ( $452.18 \text{ mg l}^{-1}$ ). The four treatments were effective in removing heavy metals, but the T3-small (As = 48 %; B = 73 %; Li = 82 %; Na = 36 %) and T4-mixed Ca = 21 %; Li = 84 %; Na = 65 %; Mg = 86 %) treatments were more effective. We concluded that zeolite can be effective to remove metals in water.

**Keywords:** Water decontamination, mineral, metals, filtration, natural zeolites.

Recibido: 06/08/2019

Aceptado: 28/11/2020

## Introducción

La demanda del recurso agua se ha incrementado alrededor del mundo debido a un crecimiento dinámico de la población humana, urbanización, irrigación e industria. Como consecuencia, el agua ha escaseado y se ha afectado su calidad, amenazando el desarrollo sostenible de algunos países y su seguridad alimentaria (WHO, 2017). La escasez de agua es especialmente importante en ambientes áridos y semiáridos, donde se tienen bajos eventos de precipitación, lo cual reduce su disponibilidad y la recarga de mantos subterráneos (Dai, 2012). Este problema puede ser devastador con la presencia de erráticas e impredecibles sequías (Villazón-Bustillos *et al.*, 2016).

La mayoría de los recursos hídricos en el norte de México son aportados por aguas subterráneas, las cuales están siendo agotadas y que además presentan altas concentraciones de elementos tóxicos, como metales pesados y metaloides (Valles-Aragon, Ojeda-Barrios, Guerrero-Prieto, Prieto-Amparan, & Sanchez-Chavez, 2017). En el periodo de 1997 a 2009, Olmos (2011) analizó 1 780 muestras de agua obtenidas de pozos en el estado de Chihuahua en el norte de México y encontró concentraciones de metales pesados por arriba de lo recomendado tanto por las normas internacionales como por las normas mexicanas (NOM, 1994). Además, 47 de los 67 municipios que conforman el estado de Chihuahua reportaron problemas de agua contaminada. En otro estudio, desarrollado por Rubio, Balderrama, Burrola, Aguilar y Saucedo (2015) se documentó que el agua potable en el municipio de Ascensión en

Chihuahua, México, contenía niveles de As, Cr, Fe, Ni, Se y Zn por encima de los niveles establecidos en la regulación mexicana (NOM, 1996), así como en los estándares internacionales (USEPA, 2013; WHO, 2012). Estos autores recomendaron la implementación de tecnologías de bajo costo, utilizando materiales locales y regionales como la zeolita para la remoción de diversos contaminantes en agua.

Se han desarrollado algunas metodologías físicas, químicas y biológicas para descontaminar el agua, como sería la de coagulantes orgánicos e inorgánicos, electrodiálisis, fluidización, sedimentación, micro filtración, nano filtración con membranas y ósmosis inversa (Demirel, Yenigun, & Onay, 2005; Kushwaha, Srivastava, & Deo-Mall, 2011; Villalobos-Rodríguez, Montero-Cabrera, Esparza, Herrera-Peraza, & Ballinas, 2012; Porwal, Mane, & Velhal, 2015; Chowdhury, Mazumder, Al-Attas, & Husain, 2016; Reddy & Yun, 2016; Prathna, Kumar, & Kennedy, 2018). Andrejkovičová *et al.* (2016) estudiaron la utilización de una zeolita natural para remover metales pesados en agua y encontraron que la zeolita removió cerca del 75 % de los metales en el siguiente orden:  $Pb^{2+} > Cd^{2+} > Zn^{2+} > Cu^{2+} > Cr^{3+}$ . En otro estudio, Zanin *et al.* (2017) especificaron que una zeolita natural removió Fe (95.4 %), Cu (96 %) y Cr (85.1 %) del agua. Diversos estudios han reportado que la zeolita constituye una excelente alternativa para la remoción de contaminantes en agua, especialmente de metales y metaloides (Andrejkovičová *et al.*, 2016; Chowdhury *et al.*, 2016). Está bien documentado que debido a su porosidad y alta carga negativa la zeolita presenta una ventaja comparativa de bajo costo para la remoción de iones (Wibowo, Mamat-Rokhmata, Mumiatia, Khairumjala, & Abdullaha, 2017; Rouquerol,

Rouquerol, Sing, Llewellyn, & Maurin, 2014). Sin embargo, pocos estudios han analizado la capacidad de remoción de la zeolita con base en su tamaño. Por tanto, el objetivo de este estudio fue evaluar la remoción de metales pesados y metaloides en agua natural utilizando filtros empacados con una zeolita natural de diversa granulometría. Esta información será de gran utilidad para diseñar filtros que remuevan iones contaminantes, permitiendo la reutilización de agua por las comunidades y contribuyendo a la sustentabilidad, con la consecuencia de mejorar la disponibilidad y calidad de este recurso natural.

## **Materiales y métodos**

El estudio se desarrolló en las instalaciones del Campo Experimental “La Campana”, perteneciente al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), que se localiza en la ciudad de Aldama, Chihuahua, México. La unidad experimental fue un filtro de 56 cm de largo empacado con 1 kg de zeolita natural. Se evaluaron cuatro tratamientos basados en diferentes tamaños de la zeolita: 70 mm en el tratamiento 1 (T1-largo); 30 mm en el tratamiento 2 (T2-mediano); 500  $\mu\text{m}$  en el tratamiento 3 (T3-pequeño); y el tratamiento 4 (T4-mixto) fue empacado con una combinación de los tres tamaños (largo, mediano y

pequeño). En el T4, las partículas grandes fueron depositadas al fondo del filtro; luego las medianas; las pequeñas se colocaron en la parte superior. Se tuvieron dos repeticiones en cada tratamiento, por lo tanto, se construyeron y empacaron ocho filtros en total. Previo al empacado de los filtros, la zeolita se tamizó de acuerdo con los tamaños requeridos para cada tratamiento.

La zeolita utilizada en este estudio se obtuvo de una compañía minera localizada cerca de ciudad Aldama, México. El mineral fue triturado y luego tamizado para obtener los tamaños de granulometría. Una muestra de la zeolita se caracterizó químicamente mediante difracción de rayos X-composición mineralógica en el laboratorio del Servicio Geológico Mexicano (SGM-México). Además, se estimó su porosidad y permeabilidad mediante análisis petrográfico en el laboratorio de SLE establecido en el Centro de Investigación Científica y de Estudios Superiores de Ensenada (CICESE). El agua filtrada en los tratamientos se obtuvo de las aguas termales de San Diego de Alcalá, localizado en la parte central del estado de Chihuahua, México ( $28^{\circ} 35' 13.83''$  N y  $105^{\circ} 32' 48.50''$  W, 1119 msnm). Se puede consultar más información sobre San Diego de Alcalá en Villalba *et al.* (2015).

Las muestras de agua se transportaron al laboratorio y mantenidas en baja temperatura ( $4^{\circ}$  C) para su análisis posterior. Los siguientes metales pesados y metaloides se cuantificaron en dos muestras del agua que sería pasada por los filtros (influyente) utilizando un espectrofotómetro de emisión óptica por plasma acoplado inductivamente (ICP-OES) Perkin-Elmer modelo ELAN 6100; plata (Ag), aluminio (Al), arsénico (As), oro (Au), boro (B), bario (Ba), berilio (Be), bismuto (Bi), calcio (Ca), cadmio

(Cd), cobalto (Co), cromo (Cr), cobre (Cu), fierro (Fe), mercurio (Hg), potasio (K), litio (Li), magnesio (Mg), molibdeno (Mo), sodio (Na), níquel (Ni), fósforo (P), plomo (Pb), antimonio (Sb), selenio (Se), estaño (Sn), estroncio (Sr), telurio (Tu), titanio (Ti), talio (Tl), vanadio (V), tungsteno (W) y zinc (Zn), además, el potencial hidrógeno (pH), los sólidos disueltos totales (SDT) y la conductividad eléctrica (CE) se determinaron con un instrumento portable-Hanna modelo HI 98130. El agua (influyente) fue pasada por los filtros tres veces, y se colectó el efluente, cuantificando los mismos parámetros medidos en el influyente y, por diferencia, determinar diferencia para los parámetros bajo estudio (% de remoción).

## **Análisis estadístico**

En una primera etapa se generó una base de datos utilizando el *software* estadístico *Minitab*; luego se practicó un ANOVA para cada parámetro, bajo un arreglo de tratamientos factorial 4x3. El factor A fue el tamaño de la partícula, con cuatro niveles: largo (T1), mediano (T2), pequeño (T3) y mixto (T4). El factor B fue el número de veces que el agua pasó por los filtros, con tres niveles: primera, segunda y tercera vez. Con este análisis fue posible detectar diferencias por efecto del tamaño de partícula (factor A), número de filtraciones (factor B) y la interacción entre ambos factores. Todos los análisis estadísticos fueron realizados con un nivel de

significancia de 95 %, por tanto,  $\alpha = 0.05$ . Cuando el análisis estadístico mostró una interacción significativa, se presenta una gráfica mostrando dicha interacción. Además, se diseñaron diversas gráficas para mostrar los efectos mayores, donde no hubo interacción (Rubio & Jiménez, 2012).

## Resultados

En la Tabla 1 se muestra la composición química de la zeolita utilizada en este estudio. La zeolita fue tipo heulandita ( $\text{CaAl}_2\text{Si}_7\text{O}_{18} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ), con 61.43 % de pureza y diversos constituyentes menores como albita, ortoclasa, cuarzo, cristobalita, muscovita, calcita, magnetita y hematita. De acuerdo con los resultados proporcionados por el CICESE, la porosidad total (porcentaje) fue de 0.29392 % y una permeabilidad de  $8.4263 \text{ e-}06$  (0.05 mD).

**Tabla 1.** Caracterización química de la zeolita utilizada en el proceso de descontaminar agua (Servicio Geológico Mexicano).

Especie mineral	Fórmula	Porcentaje (%)
Heulandita	$\text{CaAl}_2\text{Si}_7\text{O}_{18} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	61.43

Albita	NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	10.16
Ortoclasa	KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	9.78
Cuarzo	A-SiO <sub>2</sub>	6.77
Cristobalita	SiO <sub>2</sub>	6.55
Muscovita	KAl <sub>2</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	3.90
Calcita	CaCO <sub>3</sub>	1.40
Magnetita	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Trace
Hematita	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Trace

La Tabla 2 muestra el análisis de las dos muestras del influente utilizado en este estudio. Del total de 33 elementos, los siguientes 13 no fueron detectados: Ag, Al, Au, Be, Bi, Cd, Co, Cr, Fe, Hg, Sn, Te y Tl, por lo que no son discutidos. Los elementos As, B, Ca, Li, K, Mg y Na fueron detectados en altas concentraciones y, por tanto, son analizados y discutidos de forma individual. Los elementos Ba, Cu, Mo, Ni, P, Pb, Sb, Se, Sr, Ti, V, W y Zn se cuantificaron en bajas concentraciones, por lo que se analizan y discuten como grupo.

**Tabla 2.** Metales pesados y metaloides cuantificados en dos muestras de agua (influyente) de San Diego de Alcalá, Chihuahua, México.

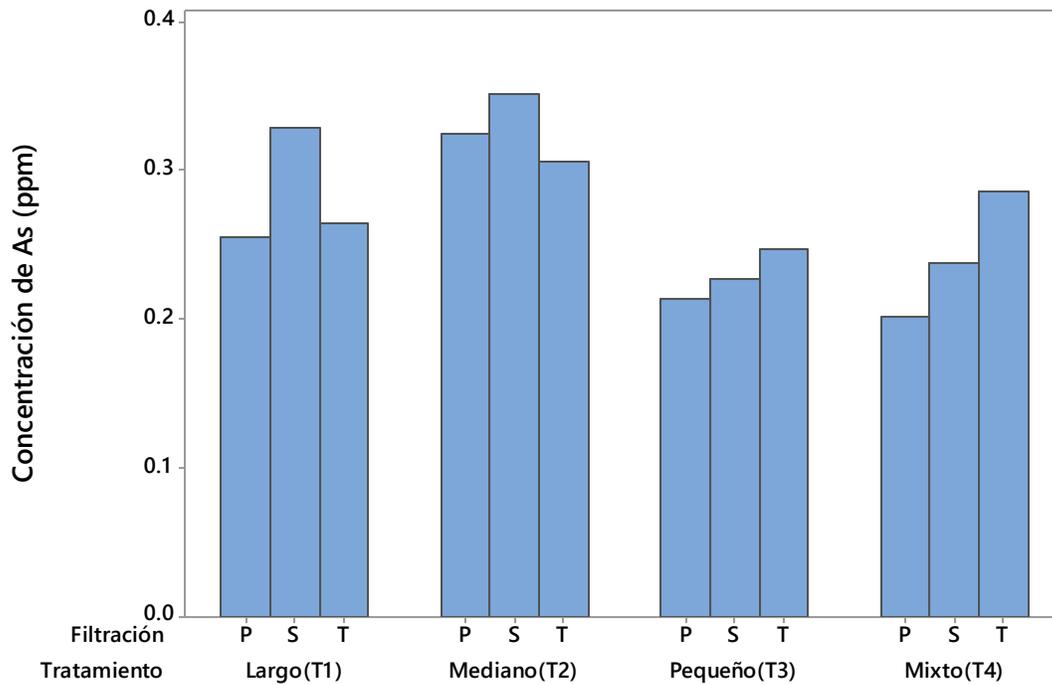
Elemento	Muestra 1	Muestra 2	Promedio	Elemento	Muestra 1	Muestra 2	Promedio
	mg l <sup>-1</sup>	mg l <sup>-1</sup>	mg l <sup>-1</sup>		mg l <sup>-1</sup>	mg l <sup>-1</sup>	mg l <sup>-1</sup>

Ag	N.D.	N.D.	N.D.	Mg	18.912	17.433	18.172
Al	N.D.	N.D.	N.D.	Mo	0.054	0.050	0.052
As	0.190	0.180	0.189	Na	473.167	431.194	452.180
Au	N.D.	N.D.	N.D.	Ni	0.003	0.002	0.002
B	1.344	1.334	1.339	P	0.560	0.550	0.555
Ba	0.025	0.025	0.025	Pb	0.004	0.004	0.004
Be	N.D.	N.D.	N.D.	Sb	0.001	0.001	0.001
Bi	N.D.	N.D.	N.D.	Se	0.002	0.001	0.001
Ca	22.659	25.144	23.901	Sn	N.D.	N.D.	N.D.
Cd	N.D.	N.D.	N.D.	Sr	1.180	1.223	1.201
Co	N.D.	N.D.	N.D.	Te	N.D.	N.D.	N.D.
Cr	N.D.	N.D.	N.D.	Ti	0.041	0.046	0.043
Cu	0.005	0.004	0.004	Tl	N.D.	N.D.	N.D.
Fe	N.D.	N.D.	N.D.	V	0.007	0.008	0.007
Hg	N.D.	N.D.	N.D.	W	0.004	0.003	0.003
K	20.918	19.271	20.094	Zn	0.009	0.005	0.007
Li	0.447	0.369	0.408				

N.D. = no detectado.

## Arsénico (As)

La concentración de As en el influente fue de  $0.189 \text{ mg l}^{-1}$  (Tabla 2), que es superior a lo recomendado para agua potable por el gobierno mexicano ( $0.025 \text{ mg l}^{-1}$ ), la Organización Mundial de la Salud ( $0.01 \text{ mg l}^{-1}$ ) y otros organismos internacionales ( $0.020 \text{ mg l}^{-1}$ ). Esta concentración también es superior de  $0.1 \text{ mg l}^{-1}$ , que es lo recomendado por el gobierno mexicano para propósitos de irrigación (DOF, 1989). Debido a que el As contiene elementos metálicos y no-metálicos se considera como un metaloide. El ANOVA detectó diferencias estadísticas debido al factor A ( $P < 0.05$ ), pero no diferencias estadísticas para el factor B ( $P > 0.05$ ) o para la interacción ( $P > 0.05$ ). En la Figura 1 se puede visualizar que T3 y T4 fueron superiores para eliminar este metaloide. El T3 removió un 48 % en la primera filtración, mientras que el T4 removió alrededor de 42 %. El T3 y el T4 también fueron mejores que los otros tratamientos en la segunda filtración, pero la capacidad de la zeolita para remover As se redujo en la tercera filtración si se compara con la remoción de la primera filtración (Figura 1).

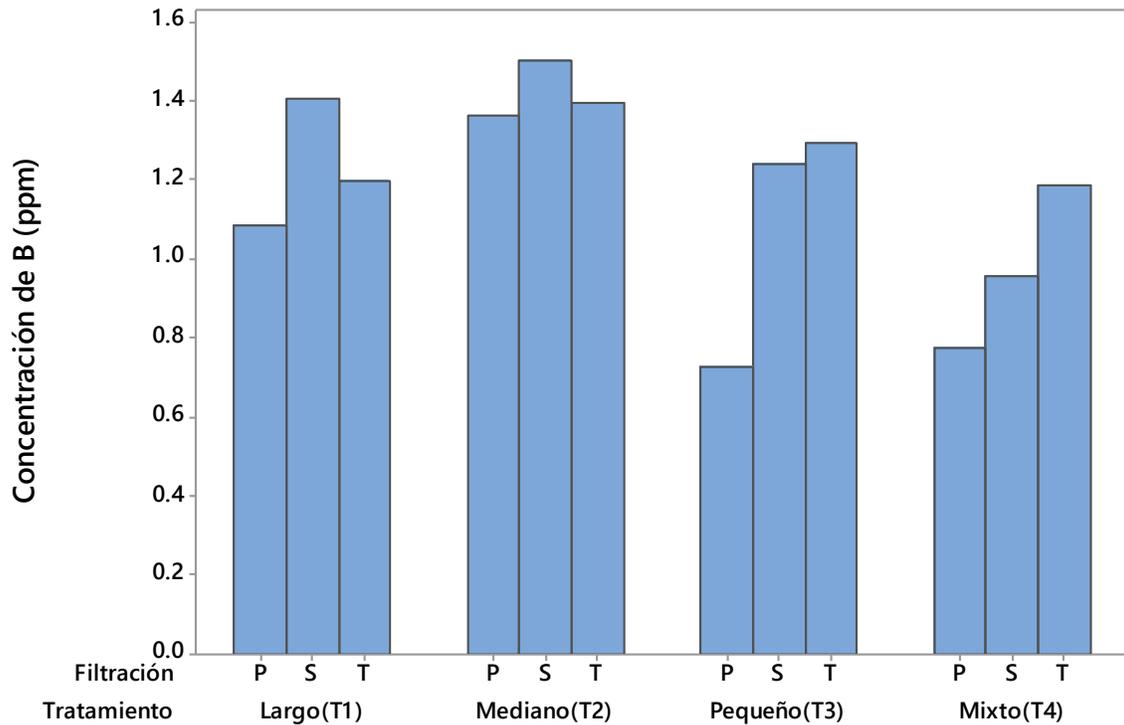


**Figura 1.** Concentración de As en el efluente de cuatro tratamientos de zeolita en tres filtraciones (P = primera, S = segunda, T = tercera).

## Boro (B)

La concentración de B en el influente fue de  $1.339 \text{ mg l}^{-1}$  (Tabla 2). Este metal es abundante en la corteza terrestre ( $10 \text{ mg kg}^{-1}$ ), por lo que su

presencia en agua se puede deber a fuentes naturales. No obstante, algunas aportaciones por fuentes antrópicas lo han incrementado en las últimas décadas. El ANOVA no detectó diferencias estadísticas para el factor A ( $P > 0.05$ ), para el factor B ( $P > 0.05$ ) o por la interacción ( $P > 0.05$ ). Los cuatro tratamientos claramente lograron remociones. El T3 removió 73 % en la primera filtración, mientras que el T4 removió 72 %. La Figura 2 ejemplifica los niveles de B en los cuatro tratamientos y en las tres filtraciones. Puede notarse que la capacidad de la zeolita para adsorber B decreció con las filtraciones. El B es encontrado en las aguas superficiales como ríos en una concentración de aproximadamente 10 ppb (Lenntech, 2017a).

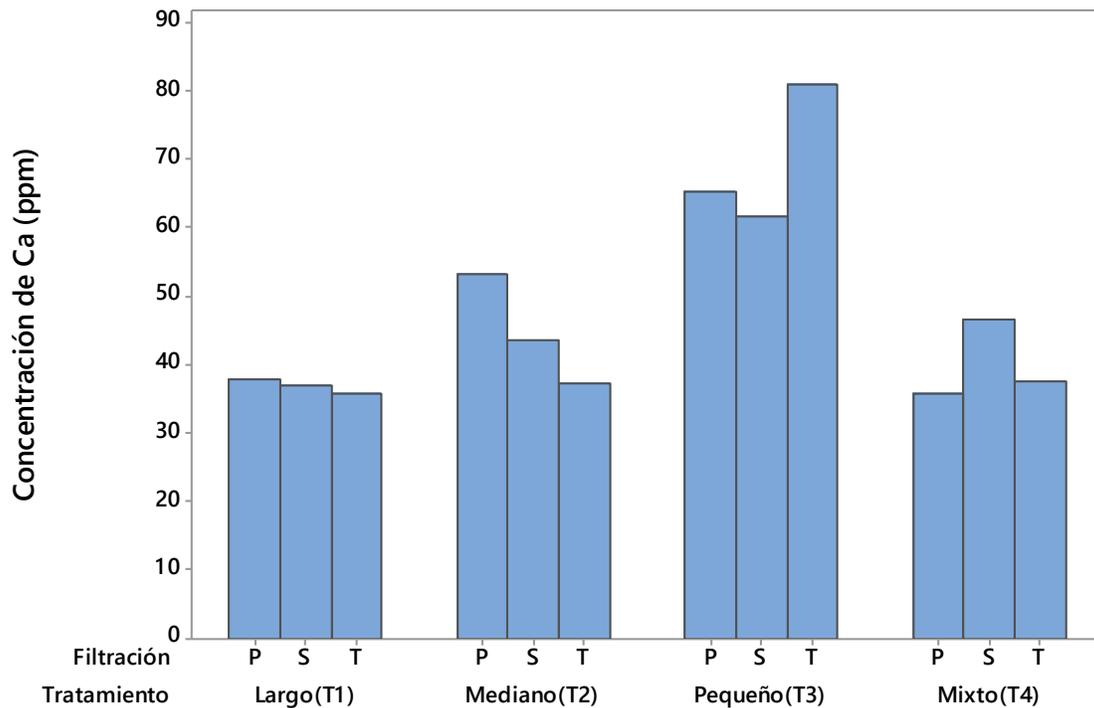


**Figura 2.** Concentración de B en el efluente de cuatro tratamientos de zeolita en tres filtraciones (P = primera, S = segunda, T = tercera).

## Calcio (Ca)

La concentración de Ca en el influente fue de 23.901 mg l<sup>-1</sup> (Tabla 2). El ANOVA detectó diferencias estadísticas para el Factor A ( $P < 0.05$ ), pero

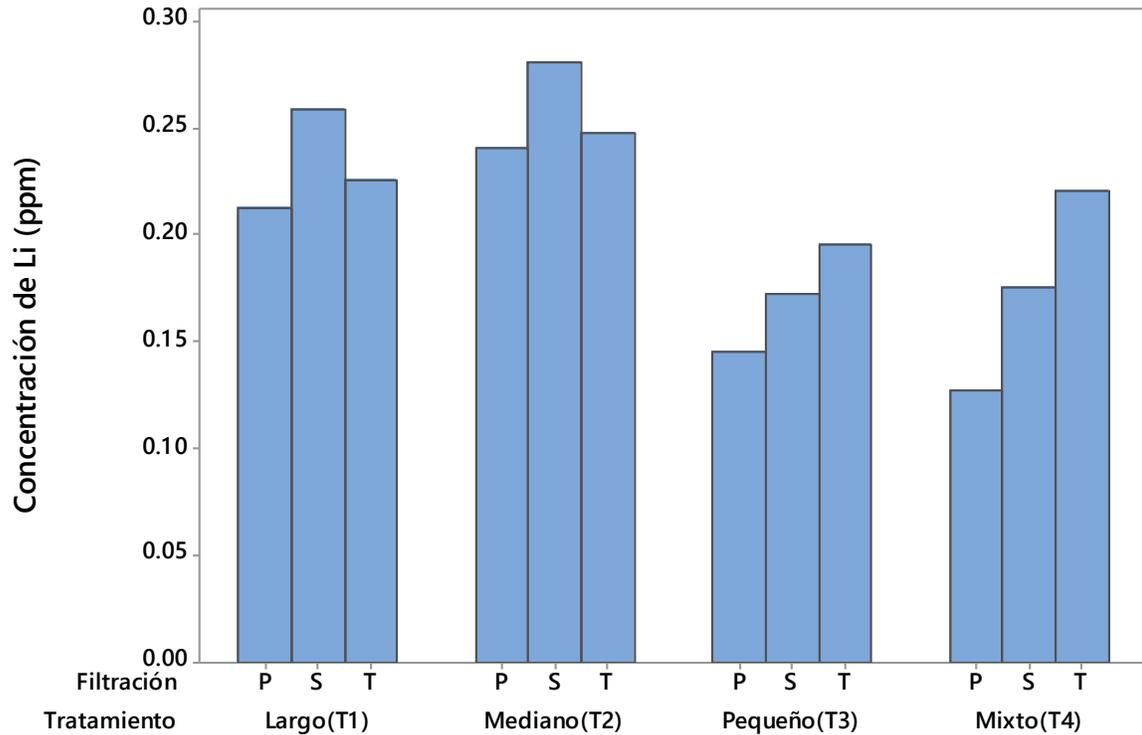
no para el factor B ( $P > 0.05$ ) ni para la interacción ( $P > 0.05$ ). El T1 y el T4 fueron los más efectivos en remover el Ca del agua. Fue notorio en el T1 que la zeolita no perdió la capacidad de remover los iones de Ca con 21 % en la primera filtración, con 23 % en la segunda y 26 % en la tercera. Este mismo efecto se observó en el T3 (Figura 3).



**Figura 3.** Concentración de Ca en el efluente de cuatro tratamientos de zeolita en tres filtraciones (P = primera, S = segunda, T = tercera).

## Litio (Li)

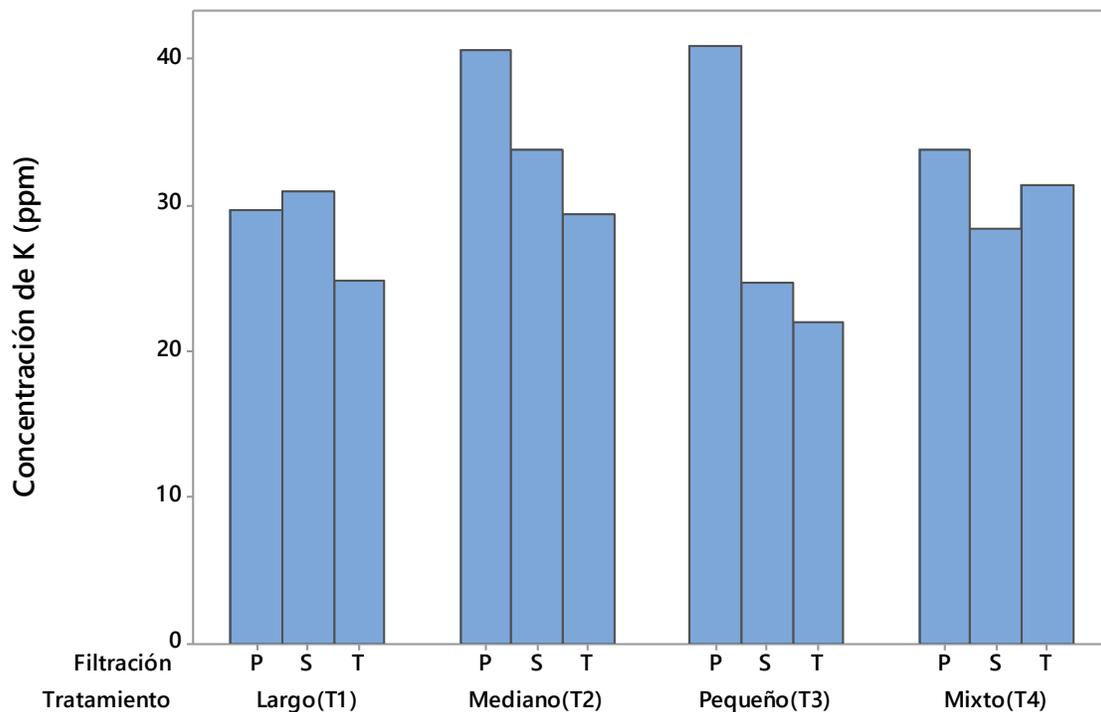
La concentración de Li en el influente fue de  $0.408 \text{ mg l}^{-1}$  (Tabla 2). El ANOVA detectó diferencias estadísticas debido al factor A ( $P < 0.05$ ), pero no se detectaron diferencias por el factor B ( $P > 0.05$ ) o por la interacción ( $P > 0.05$ ). Los cuatro tratamientos redujeron la concentración de Li en el influente; sin embargo, el T3 y el T4 fueron los más efectivos. Este efecto se puede observar en la Figura 4, donde se muestra que el T3 y el T4 redujeron el Li un 82 y un 84 %, respectivamente, en la primera filtración.



**Figura 4.** Concentración de Li en el efluente de cuatro tratamientos con zeolita en tres filtraciones (P = primera, S = segunda, T = tercera).

## Potasio (K)

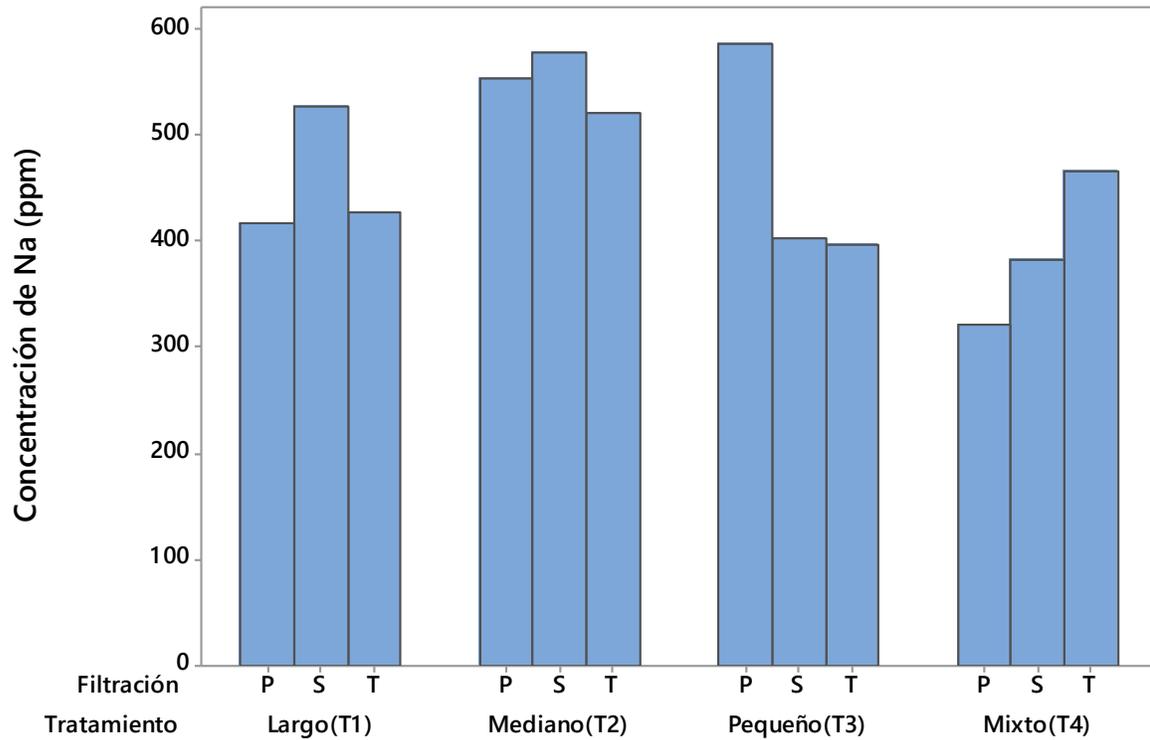
La concentración de K en el influente fue de 20.094 mg l<sup>-1</sup> (Tabla 2). El ANOVA no detectó diferencias estadísticas debido al factor A ( $P > 0.05$ ) ni para la interacción ( $P > 0.05$ ), pero sí hubo diferencias estadísticas debido al factor B ( $P < 0.05$ ). En la Figura 5 se muestra que en la primera filtración, el T1 removi6 27 % de K y el T4 removi6 16 %, mientras que el T2 y el T3 no presentaron poder de remoci6n (0 %). Tambi6n se puede notar que la capacidad de remoci6n de T2 y T3 fue mayor en la segunda y la tercera filtraci6n si se compara con la primera.



**Figura 5.** Concentraci6n de K en el efluente de cuatro tratamientos de zeolita con tres filtraciones (P = primera, S = segunda, T = tercera).

## Sodio (Na)

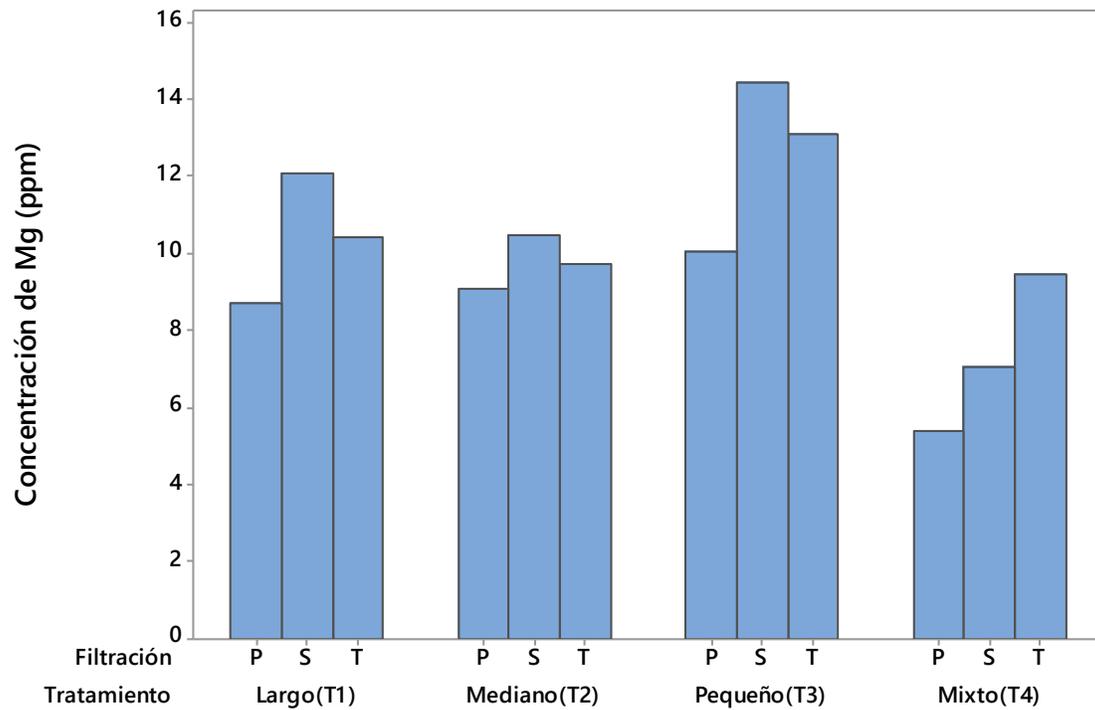
La concentración de Na en el influente fue de 452.18 mg l<sup>-1</sup>, lo cual se encuentra por arriba de 200 mg l<sup>-1</sup>, que es el límite especificado en la normatividad mexicana para agua potable (NOM, 1993). El ANOVA no detectó diferencias estadísticas para ninguno de los factores ( $P > 0.05$ ) ni para la interacción ( $P > 0.05$ ). No obstante, los cuatro tratamientos removieron niveles de Na. En la primera filtración, el T1 removió 54 %, el T2 un 40 %, el T3 un 36 % y el T4 un 65 %. La Figura 6 ejemplifica que el T4 presentó el más alto nivel de remoción de este metal.



**Figura 6.** Concentración de Na en el efluente de cuatro tratamientos con zeolita en tres filtraciones (P = primera, S = segunda, T = tercera).

## Magnesio (Mg)

La concentración de Mg en el influente fue de 18.17 mg l<sup>-1</sup> y se encontraba en la forma de Mg<sup>2+</sup>. El ANOVA no detectó diferencias estadísticas significativas para ninguno de los factores ( $P > 0.05$ ) ni para la interacción ( $P > 0.05$ ). Los cuatro tratamientos removieron cantidades significativas del ion Mg, pero el más efectivo fue el T4, el cual removió 86 % de Mg en la primera filtrada, 81 % en la segunda y 74% en la tercera (Figura 7). Estos resultados muestran claramente que la zeolita pierde su capacidad de adsorber Mg en las siguientes filtraciones. La tasa de adsorción del Mg para el T1, T2 y T3 fue similar que para el T4. En la primera filtración, el T1 adsorbió 76 %, el T2 aproximadamente 75 % y el T3 alrededor de 72 %.



**Figura 7.** Concentración de Mg en el efluente con cuatro tratamientos de zeolita y tres filtraciones (P = primera, S = segunda, T = tercera).

## Discusión

La Asociación Internacional de Mineralogía (IMA, por sus siglas en inglés) reconoce los siguientes cinco subtipos de heulandita: 1) heulandita-Ba- $\text{NaBa}_4(\text{Si}_{27}\text{Al}_9)\text{O}_{72}\cdot 24\text{H}_2\text{O}$ ; 2) heulandita-Ca-Na- $\text{Ca}_4(\text{Si}_{27}\text{Al}_9)\text{O}_{72}\cdot 24\text{H}_2\text{O}$ ; 3) heulandita-K- $\text{KCa}_4(\text{Si}_{27}\text{Al}_9)\text{O}_{72}\cdot 24\text{H}_2\text{O}$ , 4) heulandita-Na- $(\text{Na,Ca})_6(\text{Si,Al})_{36}\text{O}_{72}\cdot 24\text{H}_2\text{O}$  y la 5) heulandita-Sr- $\text{NaSr}_4(\text{Si}_{27}\text{Al}_9)\text{O}_{72}\cdot 24\text{H}_2\text{O}$ . La heulandita está estrechamente relacionada con la clinoptilolita y representa los cinco minerales del grupo denominado tectosilicatos.

De acuerdo con los resultados de este estudio, el porcentaje de remoción (%) de los metales en los cuatro tratamientos indicó que este tipo de zeolita puede ser usado como descontaminante, de preferencia para los elementos Li, Mg y B. Esta afirmación se sustenta en los siguientes niveles de remoción en los cuatro tratamientos:

T1 largo =  $\text{Li} > \text{Mg} > \text{B} > \text{Na} > \text{K} > \text{Ca} > \text{As}$

T2 mediano =  $\text{Mg} > \text{Li} > \text{B} > \text{Na} > \text{K} > \text{As} > \text{Ca}$

T3 pequeño =  $\text{Li} > \text{Mg} > \text{B} > \text{Na} > \text{K} > \text{As} > \text{Ca}$

T4 mixto =  $\text{Mg} > \text{Li} > \text{B} > \text{Na} > \text{K} > \text{As} > \text{Ca}$

Se puede notar la consistencia de los elementos que fueron removidos del agua utilizada en este estudio. Además, se puede observar que este tipo de zeolita no puede emplearse de modo eficiente para la descontaminación de los elementos K, As y Ca. En general, la zeolita no perdió su capacidad de remoción en los tres procesos de filtración.

## Arsénico (As)

La capacidad del T3 y del T4 para la remoción de As continuó bajando con la tercera filtración. Es importante notar que el T3 y el T4 fueron consistentemente más efectivos que el T1 y el T2 para remover As, lo cual fue notable en la primera filtración. Barnaby, Liefel, Jackson, Hampton y Stanton (2017) evaluaron cinco tipos de filtro para la remoción de As en un agua que presentaba concentraciones de  $10 \mu\text{g l}^{-1}$  y de  $100 \mu\text{g l}^{-1}$ , y encontraron que el filtro comercial con zeolita (ZeroWater) redujo el nivel de As a menos de  $0.05 \mu\text{g l}^{-1}$ .

El As en agua se puede originar de fuentes naturales de acuerdo con la geología del área. Otras fuentes de As en agua se pueden explicar debido a aspectos antrópicos, como sería aplicaciones de pesticidas y herbicidas, utilización de preservativos de madera, esorrentía de operaciones minerales, desechos urbanos e industriales de diferente magnitud y otros. El As es altamente tóxico para los humanos, incluso en concentraciones pequeñas, por lo que ha sido identificado como “el veneno de los reyes y el rey de los venenos”. Con independencia de la fuente aportante de As en agua, se han implementado varias metodologías para su remoción, como serían la de coagulación (Song & Gallegos-García, 2014); adsorción de nanopartículas (Martinez-Vargas et

*al.*, 2018; Ivanets *et al.*, 2018); sedimentación-filtración (Terracciano, Ge, & Meng, 2015); filtración por membranas, y ósmosis inversa (Abejon, Garea, & Irabien, 2015), entre otras. Abdolahnejad, Jafari, Ebrahimi, Mohammadi y Farrokhzadeh (2017) evaluaron diferentes tipos de filtros para la remoción de As, entre ellos un tratamiento con zeolita con un tamaño de partícula de 0.15-0.35 mm y una densidad de  $1\ 538.4\ \text{kg m}^{-3}$ . La capacidad de la zeolita para remover el As varió de acuerdo con la concentración inicial. El filtro con zeolita removió 93.1 % de As cuando la concentración inicial fue de  $0.073\ \text{mg l}^{-1}$ , pero la tasa de remoción se redujo a 15 % cuando la concentración inicial fue de  $0.33\ \text{mg l}^{-1}$ . Los investigadores recomendaron utilizar la zeolita en comunidades rurales o en comunidades pequeñas, en razón de su bajo costo y su fácil implementación. Todas las técnicas para la remoción de este metaloide buscan obtener un nivel no superior de  $0.01\ \text{mg l}^{-1}$ , el cual es el recomendado por la WHO para agua potable. Izhar, Shah y Yuan (2014) encontraron que una zeolita (clinoptilolita) presentaba una capacidad de remoción de un 66 % de As en agua residual de una planta petroquímica. Los autores recomendaron un nivel de pH de 8.0 y un tiempo de 240 min para la obtención de óptimos resultados.

## **Boro (B)**

La concentración de B en el influente utilizado en este estudio fue de  $1.339 \text{ mg l}^{-1}$  (Tabla 2) y se puede asumir que este elemento se originó de fuentes naturales. Esta concentración se considera alta para agua potable, si se toma en cuenta que la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la normatividad mexicana recomiendan que el nivel de B no debe ser mayor de  $0.05 \text{ mg l}^{-1}$  (WHO, 1998), mientras que para el agua para irrigación no sea mayor de  $1.3 \text{ mg l}^{-1}$  (FAO, 1998). El B se encuentra en las aguas de escorrentía, como por ejemplo en ríos, en una concentración de aproximadamente 10 ppb (Lenntech, 2017a). Algunos tratamientos de agua conservadores, como el de coagulación, sedimentación y filtración, no remueven el B (WHO, 1998). Skoczko, Piekutin, Szatyłowics y Niedzwiecka (2016) estudiaron la remoción de B de agua, donde un tratamiento utilizaba zeolita con un tamaño de partícula de 0.3 a 1.5 mm. El agua-influente en ese estudio tenía una concentración de B de  $2.1 \text{ mg l}^{-1}$ . El tratamiento con zeolita redujo el nivel de B a  $0.05 \text{ mg l}^{-1}$ , lo cual es similar a los resultados del presente estudio. Resulta claro que la tasa de remoción del B del agua depende de factores como tamaño de partícula, así como de la porosidad e intensidad de filtrado, entre otros.

Kluczka, Korolewicz, Zolotajkin, Simka y Raczek (2013) evaluaron un producto adsorbente que contenía una zeolita natural (clinoptilolita) y dióxido de circonio ( $\text{ZrO}_2$ ) para remover B de agua. Estos autores encontraron que la tasa de remoción era mayor cuando más cantidad de adsorbente se tenía y con un pH cercano a 8.0. Ellos reportaron un 75 % como mayor tasa de remoción. En otro estudio, Izhar *et al.* (2014) evaluaron la capacidad de adsorción de una zeolita (clinoptilolita) para la remoción de B en agua residual de una petroquímica. Documentaron una

tasa de remoción de 52 %, lo cual fue considerado como aceptable. Por tanto, los autores concluyeron que la zeolita podría ser utilizada en plantas de tratamiento de este tipo de industria.

## Calcio (Ca)

Le-van-Mao, Thanh-Vu, Xiao y Ramsaran (1994) reportaron que la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y el tamaño de poro de la zeolita son los dos mayores factores que determinan la tasa de remoción de Ca en soluciones acuosas. El Ca ( $\text{Ca}^{2+}$ ) que contenía el influente utilizado en el presente estudio fue de  $23.901 \text{ mg l}^{-1}$ . Este nivel se puede considerar alto, aunque concentraciones tan altas como 100 ppm se pueden encontrar en aguas de áreas geológicas específicas. En combinación con el ion Mg, el ion Ca es responsable de la dureza del agua y puede ser removido con un suavizador de agua que sea una sal no volátil. Cinar y Beler-Baykal (2005) valoraron la capacidad de una zeolita natural para remover Ca con el propósito de reducir la dureza del agua y concluyeron que la zeolita es una excelente alternativa debido a su capacidad de adsorber 11 mg de Ca por cada gramo de clinoptilolita.

El agua (influyente) que se utilizó en el presente estudio puede ser clasificada como ligeramente dura, pues el Departamento del Interior de los Estados Unidos de Norteamérica y la Asociación de Calidad de Agua

(Water Quality Association) establecieron un rango de 17.1 a 60 mg l<sup>-1</sup> para esta clasificación. Todos los tratamientos de zeolita en el presente estudio redujeron la clasificación del agua de ligeramente dura a una clasificación de ligera, la cual se encuentra en un rango de 0 a 17.1 mg l<sup>-1</sup>. Fue notorio que el nivel de Ca en el T3 se incrementó en la tercera filtración, mientras que este efecto fue observado en la segunda pasada para el T4. Esto se podría explicar debido a la capacidad de intercambio de iones, que se presenta de manera temporal. Por ejemplo, los iones de Ca y Mg pueden ser reemplazados por iones Na.

## Litio (Li)

En nuestro estudio se puede notar que la capacidad del T3 y del T4 para adsorber Li se redujo en la segunda y tercera filtración. La concentración de Li en agua normalmente se encuentra en un rango de 0.02 a 150 mg l<sup>-1</sup>; sin embargo, es posible encontrar niveles de 500 mg l<sup>-1</sup> o, incluso superiores, en algunas partes del mundo (Concha *et al.*, 2010). En un estudio realizado en nueve ciudades lituanas, Liaugaudaite, Mickuviene, Raskauskiene, Naginiene y Sher (2017) encontraron niveles de Li en agua en un rango de  $1.24 \pm 0.67$  a  $28.68 \pm 9.68$  mg l<sup>-1</sup>. El Li es considerado como un elemento traza para humanos y se recomienda una ingesta máxima de 1 mg d<sup>-1</sup> (Schrauzer, 2002). La importancia del Li radica en el

hecho de que altos niveles en agua han sido asociados internacionalmente con tasas menores de suicidio (Liaugaudaite *et al.*, 2017), esto es importante si se considera que la Organización Mundial de la Salud estima que se cometen alrededor de 800 000 suicidios en el mundo cada año (WHO, 2015).

El Li es altamente móvil en la naturaleza debido a que puede ser fácilmente removido de las rocas. Una vez en el agua, se encuentra en forma monovalente ( $\text{Li}^+$ ). Por esta razón, es común que las concentraciones de este elemento varíen dependiendo de la estación, particularmente en regiones donde las estaciones del año son bien diferenciadas, como es el caso del área donde se realizó el presente estudio. Hoyer, Kummer y Merkel (2015) evaluaron una zeolita de origen turco (clinoptilolita), y la compararon en su capacidad para adsorber Li con una caolinita y una bentonita. Concluyeron que la zeolita presentaba mayor capacidad para adsorber Li (alrededor del 65 %) en comparación con la caolinita (20 %) y la bentonita (55 %). En nuestro estudio, en el primer paso de filtración, el T1 removió un 76 % de Li y el T2 removió 70 %. Todos los tratamientos claramente removieron Li, pero su capacidad de adsorción se redujo notablemente con las siguientes filtraciones.

## Potasio (K)

Un agua de río típicamente presenta concentraciones del ion monovalente  $K^+$  en un rango de 2-3  $mg\ l^{-1}$ , mientras que el agua marina contiene cerca de 400  $mg\ l^{-1}$  (Lenntech, 2017b). Por tanto, el agua utilizada en este estudio tenía altos niveles de K si se compara con el nivel normal del agua de río. Está bien documentado que los iones  $K^+$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$  y  $Na^+$  presentan una dinámica capacidad de intercambio catiónico, lo que significa que estos iones pueden ser removidos o reemplazados en soluciones acuosas. De hecho, la capacidad de intercambio catiónico (CIC) es una medida del número de cationes disponible para intercambiar por unidad de peso. Este efecto pudo haber alterado la capacidad de adsorción del  $K^+$  en los diversos tratamientos que se evaluaron en este estudio. Ames (1960) valoró la capacidad de intercambio catiónico de  $K^+$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Na^+$  y  $NH_4^+$  usando clinoptilolita y reportó el siguiente orden  $K^+ > NH_4^+ > Na^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+}$ , lo que pudo afectar las tasas de adsorción. Otro estudio desarrollado por McVeigh y Weatherley (1999) demostró que el ion  $K^+$  inhibía la adsorción de  $NH_4^+$ .

## **Sodio (Na)**

Vance, Zhao, Urynowics, Ganjegunte y Gregory (2007) estimaron la capacidad de remoción de Na de agua utilizando dos tipos de zeolitas: una obtenida cerca de Winston, New Mexico, y la otra en Preston, Idaho,

ambos en EUA. Documentaron que una tonelada métrica (1 000 kg) de cualquier tipo de zeolita descontaminaba de 16 000 a 60 000 l de agua, con la ventaja de bajar la relación de adsorción de sodio (SAR) de una concentración de 30 mmol l<sup>-1</sup> a una de 10 mmol l<sup>-1</sup>, lo cual es aceptable para propósitos de irrigación. Sin embargo, la zeolita de Idaho fue mejor para la remoción de Na si se compara con la zeolita de New Mexico. El agua-influyente que utilizaron los investigadores en ese estudio contenía 411 mg l<sup>-1</sup>, lo cual es similar a la concentración de Na en el influente utilizada en nuestro estudio.

Altas concentraciones de Na<sup>+</sup> en agua para irrigación puede resultar en suelos con altos niveles de sodio intercambiable, lo que en consecuencia afecta la estructura del suelo y reduce su capacidad hidráulica. La salinidad y la presencia del sodio (sodicidad) son las mayores preocupaciones respecto a la calidad del agua en regiones áridas y semiáridas. Por esta razón, el laboratorio de salinidad en EUA desarrolló la siguiente ecuación para obtener la relación de adsorción de sodio (RAS), útil para los análisis de suelo y agua:

$$\text{RAS} = \frac{\text{Na}^+}{\sqrt{1/2(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})}}$$

Este tipo de análisis es importante debido a que algunos cultivos no pueden tolerar altos niveles de Na en agua. Por ejemplo, los cultivos de aguacate y cítricos no resisten agua con niveles de SAR más altos que 3.0, mientras que otros cultivos pueden resistir niveles tan altos de SAR

como 46 (Bouwer & Idelovitch, 1987). Un SAR superior a 4.0 no es recomendable para propósitos de irrigación debido a que este valor estaría indicando altos niveles de Na en el agua (Gibb, Dynes, & Chang, 2017). Es importante especificar que los niveles de Na en el influente, en este estudio, se redujeron a un nivel para ser utilizados para motivos de irrigación de acuerdo con las normas de la Agencia de Protección Ambiental (Environmental Protection Agency) de EUA, que especifica una concentración de  $< 69 \text{ mg l}^{-1}$ .

## **Magnesio (Mg)**

Tomic, Rajic, Hrenovic y Povrenovic (2012) evaluaron una clinoptilolite para el eliminar Mg de aguas termales, utilizando diferentes concentraciones de Mg y distintos niveles de pH (de 5 a 9). Encontraron que la tasa de adsorción de Mg fue mayor cuando se tenía una mayor concentración de Mg. Además, documentaron que el pH en un rango de 5 a 7 no incrementa la adsorción de Mg, pero la tasa de adsorción se incrementó a 18 % con un pH de 8 y dicha tasa fue similar cuando se tenía un pH de 9.0. Los autores concluyeron que la clinoptilolita utilizada en su estudio presentaba una baja capacidad de adsorción de Mg. El pH del agua en nuestro estudio se encontró en un rango de 8.0 a 8.5 en el influente y en el efluente.

## Otros metales

Fue particularmente difícil evaluar la efectividad de la zeolita para eliminar Ba, Cu, Mo, Ni, P, Pb, Sb, Se, Sr, Ti, V, W y Zn debido a sus bajas concentraciones. Sin embargo, la mayoría de los elementos no fueron detectados después de la filtración, por lo que se asume que fueron eliminados en el proceso. Sin embargo, Ciosek y Luk (2018) encontraron que una zeolita fue más efectiva para la remoción de  $Pb^{2+}$  que para  $Fe^{3+}$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$  y  $Ni^{2+}$ .

## Potencial hidrógeno (pH) y conductividad eléctrica (CE)

El nivel de pH en una solución juega un papel esencial en la capacidad de la zeolita para adsorber diferentes elementos, aunque su rol es controversial. En nuestro estudio, el pH no varió significativamente después de pasar el agua por los tratamientos y se tuvo un rango de 8.0 a 8.5. Por ejemplo, la tasa de adsorción de As es más alta con un pH

mejor a 8.0 si se compara con un nivel de pH superior (Velazquez-Peña, Solache-Rios, Olguina, & Fall, 2019). En otro estudio, Motsi, Rowson y Simmons (2009) documentaron que un pH menor a 4.5 reducía la capacidad de la zeolita para adsorber  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  y  $\text{Mn}^{2+}$ , lo cual fue confirmado por las investigaciones de Inglezakis, Loizidou y Grigoropoulo (2003), y de Wingenfelder, Hansen, Furrer y Schulin (2005).

Con respecto al parámetro de CE, en nuestro estudio la concentración de este parámetro no varió de modo significativo en los tratamientos bajo análisis, notándose un rango de 1.10 a 1.30  $\text{mS cm}^{-2}$ . En una investigación donde se evaluó arena, carbón activado y zeolita como materiales filtrantes para la remoción de diversos elementos del agua, Vera, Rojas, Chávez y Arriaza (2016) encontraron que la zeolita tenía la capacidad de reducir los niveles de CE en agua. Los autores concluyeron que la zeolita tenía la capacidad de reducir las sales en agua, ya que en sus resultados se obtuvo una reducción de 20 % sin afectar otros parámetros o alcanzar un nivel de saturación. Estos resultados son importantes si se considera que las sales en agua normalmente afectan el suelo, en particular, en zonas áridas y semiáridas. La Organización para la Agricultura y la Alimentación (Food and Agriculture Organization, FAO, por sus siglas en inglés) de las Naciones Unidas (United Nations) ha establecido que cerca del 50 % de las tierras irrigadas en zonas áridas y semiáridas presentan problemas de salinidad (FAO, 1998). Las sales claramente perturban de forma negativa a los suelos, al afectar su fertilidad por una declinación de la actividad microbiológica, lo que ocasiona bajos niveles de productividad de los cultivos.

## Conclusiones

De acuerdo con los resultados del presente estudio se pueden establecer tres conclusiones: 1) la zeolita puede emplearse para descontaminar metales alcalinos en agua, en particular en el siguiente orden de importancia:  $\text{Li} > \text{Mg} > \text{B} > \text{Na} > \text{K} > \text{Ca} > \text{As}$ ; 2) el tratamiento con partícula pequeña de zeolita y el tratamiento mixto fueron mejores para la descontaminación de agua, por lo que esta información puede servir para el diseño de filtros comerciales; 3) los procesos de filtración no afectaron la capacidad de remoción de la zeolita utilizada en este estudio. Es altamente recomendable evaluar otros tipos de zeolitas naturales para generar información que pueda usarse en aplicaciones prácticas para otros sectores.

## Agradecimientos

Los autores deseamos manifestar un agradecimiento al estudiante Yuren Rafael Enríquez Márquez, así como al señor Saúl Cruz Acosta, propietario

de la empresa zeolita de Aldama, por aportar gratuitamente el material utilizado en este estudio.

### **Financiamiento**

Esta investigación fue parcialmente financiada por el proyecto titulado "Utilización de zeolitas naturales mexicanas para la remoción de contaminantes en agua", registro 747 de la convocatoria "Atención a Problemas Nacionales 2015" de Conacyt, sustentado en el convenio I000/513/2016.

### **Referencias**

- Abdolahnejad, L., Jafari, N., Ebrahimi, A., Mohammadi, A., & Farrokhzadeh, H. (2017). Removal of arsenic and coliform bacteria by modified sand filter with slang and zeolite from drinking water. *Health Scope*, 6(3), e15170.
- Abejon, A., Garea, A., & Irabien, A. (2015). Arsenic removal from drinking water by reverse osmosis: Minimization of costs and energy consumption. *Separation and Purification Technology*, 144, 46-53.
- Ames, L. L. (1960). The cation sieve properties of clinoptilolite. *The American Mineralogist*, 45, 689-700.
- Andrejkovičová, A., Sudagar, A., Rocha, J., Patinha, C., Hajjaji, W., Ferreira-da-Silva, E., Velosa, E., & Rocha, F. (2016). The effect of natural zeolite on microstructure, mechanical and heavy metals

- adsorption properties of metakaolin based geopolymers. *Applied Clay Science*, 126, 141-152.
- Barnaby, R., Liefel, A., Jackson, B. P., Hampton, T. H., & Stanton, B. A. (2017). Effectiveness of table top water pitcher filters to remove arsenic from drinking water. *Environmental Research*, 158, 610-615.
- Bouwer, H., & Idelovitch, E. (1987). Quality requirement for irrigation with sewer water. *Journal of Irrigation, Drainage and Engineering*, 113(4), 516-535.
- Chowdhury, S., Mazumder, M. J., Al-Attas, O., & Husain, T. (2016). Heavy metals in drinking water: Occurrences, implications, and future needs in developing countries. *Science of the Total Environment*, 569:476-488.
- Cinar, S., & Beler-Baykal, B. (2005). Ion Exchange with natural zeolites: An alternative for water softening? *Water Science & Technology*, 51(11), 71-77.
- Ciosek, A. L., & Luk, G. K. (2018). Effect of operation parameters on heavy metallic ion removal from mine waste by natural zeolite. *International Journal of Environmental Pollution and Remediation*, 6(1), 10-24. Recuperado de <https://doi.org/10.11159/ijep.2018.002>.
- Concha, G., Broberg, K., Grander, M., Cardozo, A., Palm, B., & Vahter, M. (2010). High-level exposure to lithium, boron, cesium, and arsenic via drinking water in the Andes of northern Argentina. *Environmental Science and Technology*, 44(17), 6875-6880.

- Dai, A. (2012). Increasing drought under global warming in observations and models. *Nature Climate Change*, 3, 520-581.
- Demirel, B., Yenigun, O., & Onay, T. (2005). Anaerobic treatment of dairy wastewaters: A review. *Process Biochemistry*, 40, 2583-2595.
- DOF. (1989). Criterios ecológicos de calidad de agua. Diario Oficial de la Federación. CE-CCA-001-1989. *Diario Oficial de la Federación*, miércoles 13 de diciembre de 1989, Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología.
- FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations. (1998). Salt-Affect soils and their management. Soils Resources Management and Conservation Service FAO. Land and Water Development Division. *Soil Bulletin*, 39.
- Gibb, N. P., Dynes, J. J., & Chang, W. (2017). Synergistic desalination of potash-brine impacted groundwater using a dual adsorbent. *Science of The Total Environment*, 593, 99-108.
- Hoyer, M., Kummer, N-A., & Merkel, B. (2015). Sorption of lithium on Bentonite, Kaolin and zeolite. *Geosciences*, 5, 127-140. DOI: 10.3390/geosciences5020127
- Inglezakis, V. I., Loizidou, M. D., & Grigoropoulo, H. P. (2003). Ion exchange of  $Pb^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$  and  $Cr^{3+}$  on natural clinoptilolite: Selectivity determination and influence of acidity on metal uptake. *Journal of Colloid Interface Science*, 261, 49-54.
- Ivanets, A. I., Srivastava, V., Roshchina, M. Y., Sillanpaa, M., Prozorovich, V. G., & Pankov, V. V. (2018). Magnesium ferrite nanoparticles as

- a magnetic sorbent for the removal of  $Mn^{2+}$ ,  $Co^{2+}$ ,  $Ni^{2+}$  and  $Cu^{2+}$  from aqueous solution. *Ceramics International*, 44, 9097-9104.
- Izhar, S., Shah, I. M. H., & Yuan, C. L. (2014). Removal of boron and arsenic from petrochemical wastewater using zeolite as adsorbent. In: Aris, A., Tengku, I. T., Harun, R., Abdullah, A., Ishal, M. (eds.). *From sources to solution*. Singapore, Singapore: Springer.
- Kluczka, J., Korolewicz, T., Zolotajkin, M., Simka, A., & Raczek, M. (2013). A new adsorbent for boron removal from aqueous solutions. *Environmental Technology*, 34(9-12), 1369-1376.
- Kushwaha, J. P., Srivastava, V. C., & Deo-Mall, I. (2011). An overview of various technologies for the treatment of dairy wastewaters. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 51(5), 442-452. Recuperado de <https://doi.org/10.1080/10408391003663879>
- Lenntech. (2017a). *Boron (B) and water: Reaction mechanisms, environmental impact and health effects*. Recuperado de [www.lenntech.com/periodic/water/boron/boron-and-water.htm](http://www.lenntech.com/periodic/water/boron/boron-and-water.htm)
- Lenntech. (2017b). *Potassium (K) and water: Reaction mechanisms, environmental impact and health effects*. Recuperado de [www.lenntech.com/periodic/water/potassium/potassium-and-water.htm](http://www.lenntech.com/periodic/water/potassium/potassium-and-water.htm)
- Le-Van-Mao, R., Thanh-Vu, N., Xiao, S., & Ramsaran, A. (1994). Modified zeolites for the removal of calcium and magnesium from hard water. *Journal of Materials Chemistry*, 4(7), 1143-1147.
- Liaugaudaite, V., Mickuviene, N., Raskauskiene, N., Naginiene, R., & Sher, L. (2017). Lithium levels in the public drinking water supply

and risk of suicide; a pilot study. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 43, 197-201. DOI: [org/10.1016/j.te.b.2017.03.009](https://doi.org/10.1016/j.te.b.2017.03.009)

Martinez-Vargas, A., Martinez, A. I., Hernandez-Beteta, E.E., Mijangos-Ricardez, O.F., Vazquez-Hipolito, V., Patiño-Carachure, C., & Lopez-Luna, J. (2018). As(III) and As(V) adsorption on manganese ferrite nanoparticles. *Journal of Molecular Structure*, 1154, 524-534.

McVeigh, R. J., & Weatherley, L. R. (1999). The effect of other cations in wastewater on the ion-exchange removal of ammonium ion. *Developments in Chemical Engineering and Mineral Processing*, 7(1-2), 69-84.

Motsi, T., Rowson, N. A., & Simmons, M. (2009). Adsorption of heavy metals from acid mine drainage by natural zeolite. *International Journal of Mineral Processing*, 92(1-2), 42-48. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2009.02.005>

NOM, Norma Oficial Mexicana. (1994). Norma Oficial Mexicana 127-SSA1-1994. Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. Secretaría de Salud Ambiental. Diario Oficial de la Federación, 22 de noviembre de 2000, México, DF, México.

NOM, Norma Oficial Mexicana. (1993). Norma Oficial Mexicana 014-SSA1-1993. Procedimientos sanitarios para el muestreo de agua para uso y consumo humano en sistemas de abastecimiento de agua públicos y privados. México, DF, México: Secretaría de Salubridad y Asistencia.

NOM, Norma Oficial Mexicana. (1996). Norma Oficial Mexicana 001-SEMARNAT-1996. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Diario Oficial de la Federación, 6 de enero de 1997. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, DF, México.

Olmos, M. M. (2011). *Remoción de arsénico del agua por fitorremediación con Eleocharis macrostachya en humedales construidos de flujo subsuperficial* (tesis de doctorado). Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C. (CIMAV). Chihuahua, Chihuahua, México.

Porwal, H. J., Mane, A. V., & Velhal, S. G. (2015). Biodegradation of dairy effluent by using microbial isolated obtained from activated sludge. *Water Resource and Industry*, 9, 1-15.

Prathna, T. C., Kumar, S. S., & Kennedy, M. (2018). Nanoparticles in household level water treatment: An overview. *Separation and Purification Technology*, 199, 260-270.

Reddy, D. H., & Yun, Y. S. (2016). Spinel ferrite magnetic adsorbents; alternative future materials for water purification? *Coordination Chemistry Reviews*, 315, 90-111, Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2016.01.012>

Rouquerol, F., Rouquerol, J., Sing, K. S. W., Llewellyn, P., & Maurin, G. (2014). *Adsorption by powders and porous solids principles. Methodology, and applications* (2<sup>nd</sup> ed.). San Diego, USA: Academic Press.

- Rubio, A. H. & Jimenez, C. J. (2012). *Estadística aplicada y análisis con Minitab*. Chihuahua, México: Universidad Autónoma de Chihuahua.
- Rubio, A. H., Balderrama, T. L., Burrola, B. E., Aguilar, N., & Saucedo, T. R. (2015). Niveles de contaminación del agua potable en la cabecera municipal de Ascensión, Chihuahua, México. *Nova Scientia*, 14(7), 178-201.
- Schrauzer, G. A. (2002). Lithium: Occurrence, dietary intakes, nutritional essentiality. *Journal of the American College of Nutrition*, 21(1), 14-21.
- Skoczko, I., Piekutin, J., Szatyłowics, E., & Niedzwiecka, M. (2016). Removal of boron from groundwater by filtration through selected filter bed materials. *Annual Set the Environmental Protection*, 18, 861-872.
- Song, S., & Gallegos-García, M. (2014). Chapter 11. Arsenic removal from water by the coagulation process. In: *The role of colloidal systems in environmental protection* (pp. 261-277). Oxford, UK: Elsevier.
- Terracciano, A., Ge, J., & Meng, X. (2015). A comprehensive study of treatment of arsenic in water combining oxidation, coagulation, and filtration. *Journal of Environmental Sciences*, 36, 178-180.
- Tomic, S., Rajic, N., Hrenovic, J., & Povrenovic, D. (2012). Removal of Mg from spring water using natural clinoptilolite. *Clay Minerals*, 47, 81-92.
- USEPA, United States Environmental Protection Agency. (2013). Drinking water contaminants. National Primary drinking water regulations. Recuperado de <http://water.epa.gov/drink/contaminants/#List>

- Valles-Aragon, M. C., Ojeda-Barrios, D. L., Guerrero-Prieto, V. M., Prieto-Amparan, J. A., & Sanchez-Chavez, E. (2017). Calidad del agua para riego en una zona nogalera del estado de Chihuahua. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 33(1), 85-97.
- Vance, G. F., Zhao, H., Urynowics, M. A., Ganjegunte, G. K., & Gregory, R. W. (2007). Potential utilization of natural zeolites for treating coalbed natural gas (CBNG) produced waters studies (abstract). In: Barnhisel, R. I. (ed.). *National Meeting American Society of Mining and Reclamation*, Gillette, Lexington, USA, June 2-7.
- Velazquez-Peña, G. C., Solache-Rios, M., Olguna, M. T. & Fall, Ch. (2019). As(V) sorption by different natural zeolite frameworks modified with Fe, Zr and FeZr. *Microporous and Mesoporous Materials*, 273, 133-141.
- Vera, P. I. L., Rojas, A. M., Chávez, Y. W., & Arriaza, T. B. T. (2016). Evaluación de materiales para el reúso en agricultura de aguas residuales tratadas provenientes de zonas áridas. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 26(1), 5-19.
- Villalba, M. L., Colmenero-Sujo, L., Rubio-Arias, H., Pinales-Munguía, A., Espino, M. S., De-la-Garza, R., Silva, H. H., & Viramontes, O. (2015). Cuantificación de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) en aire y dosis de radiación en baños termales del norte de México. *Nova Scientia*, 15(7), 153-167.
- Villalobos-Rodriguez, R., Montero-Cabrera, M. E., Esparza, H., Herrera-Peraza, E., & Ballinas, M. L. (2012). Uranium removal from water

using cellulose triacetate membranes added with activated carbon.  
*Applied Radiation and Isotopes*, 70(5), 872-881.

Villazón-Bustillos, D., Rubio-Arias, H. O., Ortega-Gutiérrez, J. A., Rentería-Villalobos, M., González-Gurrola, L. C., & Pinales-Munguia, A. (2016). Análisis en series de tiempo para el pronóstico de sequía en la región noroeste del estado de Chihuahua. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 3(9), 307-315.

WHO, World Health Organization. (1998). *Boron*. Geneva, Switzerland: World Health Organization & International Programme on Chemical Safety. Recuperado de <https://apps.who.int/iris/handle/10665/42046>

WHO, World Health Organization. (2012). *Arsenic, metals, fibers and dust, volume 100 c a review of human carcinogen. IARC monographs on the evaluation of human carcinogenic risks to humans*. Lyon, France: World Health Organization.

WHO, World Health Organization. (2015). *Mental Health. Suicide data*. Geneva, Switzerland: World Health Organization. Recuperado de [https://www.who.int/mental\\_health/prevention/suicide/suicideprevent/en/](https://www.who.int/mental_health/prevention/suicide/suicideprevent/en/)

WHO, World Health Organization. (2017). *Progress on drinking water, sanitation and hygiene*. Geneva, Switzerland: World Health Organization. Recuperado de [https://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/publications/jmp-2017/en/](https://www.who.int/water_sanitation_health/publications/jmp-2017/en/)

- Wibowo, E., Mamat-Rokhmata, S., Mumiatia, R., Khairumjala, & Abdullaha, M. (2017). Utilization of natural zeolite as sorbent material for seawater desalination. *Procedia Engineering*, 170, 8-13.
- Wingenfelder, U., Hansen, C., Furrer, G., & Schulin, R. (2005). Removal of heavy metals from mine water by natural zeolites. *Environmental Science Technology*, 39, 4606-4013.
- Zanin, E., Scapinello, J., De-Oliveira, M., Lazarotto, R. C., Francescon, F., Freitas, L., Muneron-de-Mello, J. M., Sntonio-Fiori, M., Oliveira, V., & Dal-Magro, J. (2017). Adsorption of heavy metals from wastewater graphic industry using clinoptilolite zeolite as adsorbent. *Process Safety and Environmental Protection*, 105, 194-200.