

## Remoción de arsénico de agua potable mediante adsorción sobre óxido y oxihidróxidos de hierro

### *Removal of arsenic from drinking water by adsorption on iron oxides and oxyhydroxides*

Ma. Concepción Martínez-Luévanos<sup>a\*</sup>,  
Elsa Nadia Aguilera-González<sup>a</sup>,  
Antonia Martínez-Luévanos<sup>a</sup>  
Maestría en Ciencia y Tecnología Químicas.  
Facultad de Ciencias Químicas.  
Universidad Autónoma de Coahuila, Blvd. V. Carranza, s/n.  
República Ote., 25280; Saltillo, Coahuila, México.  
**\*Autor de correspondencia:** [martinezma@uadec.edu.mx](mailto:martinezma@uadec.edu.mx)

### RESUMEN

El arsénico es un elemento con alto nivel de toxicidad, por lo que la concentración de éste en el agua potable es causal de problemas severos en la salud del hombre. En muchas regiones del mundo, el arsénico se encuentra a niveles de concentración superiores a 10 µg/L, que es el límite permitido para el agua de consumo humano. Diversas tecnologías han sido utilizadas para reducir los niveles de arsénico del agua potable, siendo la adsorción la más ampliamente empleada por su elevada eficiencia de eliminación de arsénico, fácil operación y bajo costo. La adsorción de arsénico requiere de adsorbentes eficientes y económicos, por lo cual los óxidos de hierro, tanto naturales como sintéticos, son los adsorbentes con más utilizados para eliminar arsénico del medio acuoso, debido a su alta capacidad de adsorción, accesibilidad y bajo costo.

**Palabras clave:** *adsorción, arsénico, óxidos de hierro, oxihidróxidos de hierro.*

### ABSTRACT

Arsenic is an element with high level of toxicity, so the concentration of this in drinking water, is causal of severe problems in the health. In many regions of the world, arsenic is found at concentration levels above 10 µg/L, which is the limit

allowed for water for human consumption. Various technologies have been used to reduce the arsenic levels of drinking water, while the adsorption is the most widely used technology due to its high arsenic removal efficiency, easy operation, and low cost. Arsenic adsorption requires efficient and economical adsorbents, iron oxides and oxyhydroxides, both natural and synthetic iron oxides, are commonly used adsorbents with the most application to eliminate arsenic from the aqueous medium, due to their high capacity of adsorption, accessibility, and low costs

**Keywords:** *adsorption, arsenic, iron oxides*

## 1. Introducción

La presencia de contaminantes en el agua subterránea es un peligro potencial, ya que éstos causan efectos negativos tanto en los seres vivos como en el medio ambiente. Entre los principales contaminantes del agua de consumo, está el arsénico (As), el cual es considerado como uno de los elementos más tóxicos y cancerígenos (Askari et al., 2017). En la Figura 1 se presenta la relación de la toxicidad del arsénico, su remoción y la salud

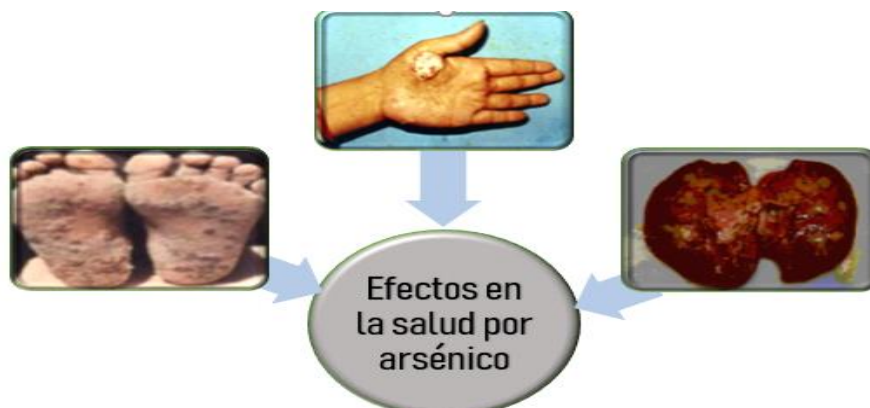


**Figura 1** Relación del consumo de agua contaminada con arsénico, la adsorción y la salud.

Este elemento abunda en la naturaleza, y puede estar en forma libre o asociado a otros minerales. Su distribución y contaminación en los mantos acuíferos es generado tanto de forma natural (erupciones volcánicas, aguas geotermales,

composición de las rocas que están inmersas en los pozos de las aguas subterráneas) como antropogénica (actividades agrícolas, mineras, industriales, quema de combustibles) (Pashley & Pashley, 2015). Debido a que el arsénico posee propiedades metálicas y no metálicas, se encuentra clasificado en el grupo de los metaloides. Sin embargo, algunos investigadores lo consideran como un metal (Singh et al., 2015). Los estados de oxidación que presenta el arsénico son: As (V), As (III), As (0) y As (-III), predominando las especies de arsenito (III) y arseniato (V), siendo el arsenito el más tóxico de estas dos especies (Singh et al., 2015).

La contaminación del agua subterránea por arsénico, es un problema que afecta a una gran cantidad de países en el mundo. Millones de personas están expuestas a la intoxicación por este elemento a través del consumo del agua potable y alimentos preparados con agua contaminada (Singh et al., 2015), generando problemas de salud, como lo son diversos tipos de cáncer, alteraciones de la piel, hipertensión, neurosis y náuseas (Askari et al., 2017; <http://noticias-ambientales-argentina.blogspot.com/2013/08/la-contaminacion-con-arsenico-en.html>). En la Figura 2 se presentan algunas de las enfermedades causadas por el consumo crónico del arsénico.



**Figura 2.** Efectos en la salud causado por el consumo prolongado de aguas contaminadas por arsénico.

Considerando la toxicidad del arsénico y el peligro que su consumo genera en los seres vivos y medio ambiente, la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Agencia de Protección Ambiental (EPA), establecieron un límite permisible de 0.01 m/L de arsénico en el agua de bebida (Jadhav et al., 2015). Por su parte, la Norma Oficial Mexicana 127 (NOM-127-SSA1-1994) establece un valor de 0.05 mg L<sup>-1</sup>, como límite permisible de concentración de arsénico en el agua para uso y consumo humano (SEMARNAT, 1994).

En la actualidad existe una amplia variedad de tecnologías para el tratamiento y remoción de contaminantes del agua, destacándose entre éstos el arsénico. Se logra una eficiencia de adsorción de éste de 70 a 99%, dependiendo de la tecnología de extracción y del material adsorbente utilizado. Entre las tecnologías comúnmente empleadas en la remoción de arsénico en el agua, están la oxidación, floculación, osmosis inversa (Nicomel et al., 2016), filtración, intercambio iónico y adsorción (Hua, 2018). No obstante, de contar con una amplia gama de tecnologías para eliminar el arsénico del agua, la mayoría de ellas requieren de equipo especial o complejo, además de que el costo de operación es alto, por lo que se requiere el desarrollo de alternativas eficientes, económicas y no contaminantes.

Actualmente, la adsorción es una de las tecnologías más viable y eficiente, ya que ésta representa un fácil manejo, bajo costo de operación, alta capacidad de remoción, así como la reutilización del adsorbente (Acuña Piedra et al., 2016).

En años recientes se ha incrementado el estudio de la adsorción de arsénico sobre una gran variedad de materiales adsorbentes como zeolitas, arcillas, alúmina activada, carbón activado y óxidos metálicos, especialmente, los óxidos de hierro, los cuales han tenido una gran aplicación debido a su elevada capacidad de adsorción de contaminantes del agua (López, 2013).

El propósito del presente trabajo es presentar información actual sobre el tema de la remoción de arsénico del agua potable mediante el método de adsorción, utilizando como adsorbentes compuestos de óxidos de hierro.

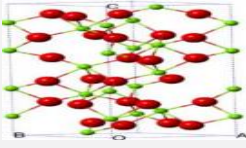
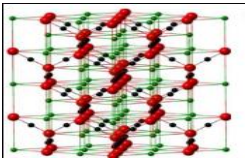
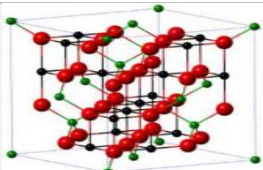
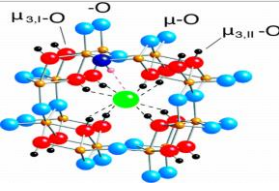
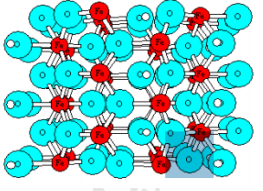
## 2. Óxidos de hierro como adsorbentes

La eficiencia de remoción de arsénico por adsorción se ve influenciada por diversos factores, destacándose el tipo de material utilizado, lo que ha propiciado una extensa investigación y desarrollo de materiales adsorbentes, los cuales han sido tratados o modificados para obtener una mayor capacidad de adsorción.

La extensa aplicación de los óxidos de hierro radica en su elevada selectividad y afinidad por contaminantes orgánicos e inorgánicos, así como su alta área superficial selectiva, costo bajo, fácil acceso y proceso de síntesis sencillo (Luo et al., 2012).

Los óxidos de hierro son compuestos que poseen estructura cristalina y carácter iónico. Estos óxidos se encuentran en la naturaleza formando parte de los suelos y Otros minerales. Estos compuestos que se pueden encontrar en forma anhidra de  $\text{FeO}(\text{OH})$  o hidratada, cuya fórmula es  $\text{FeO}(\text{OH}) \cdot n\text{H}_2\text{O}$ . Algunos óxidos de hierro son obtenidos mediante diversos métodos de síntesis bajo condiciones extremas de presión y temperatura (Tresintsi et al., 2012). A la fecha, son 16 óxidos de hierro conocidos, destacándose los siguientes óxidos: hematita, magnetita, maghemita, akaganeita y goetita (Lu et al., 2011). En la Tabla 1 se muestran los óxidos de hierro más comunes y empleados en la remoción de arsénico.

Tabla 1 Óxidos y oxihidróxidos de hierro más empelados en la adsorción de arsénico.

Nombre	Formula	color	estructura	Referencia
<b>Hematita</b>	$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	Gris oscuro, negro, rojizo o pardo rojizo		17
<b>Magnetita</b>	$\text{Fe}_3\text{O}_4$	Negro agrisado		17
<b>Maghemita</b>	$\Gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$	Marrón, rojo ladrillo Pardo oscuro		17
<b>Akaganeita</b>	$\beta\text{-FeOOH}$	Marrón oxidado o marrón		18
<b>Goetita</b>	$\alpha\text{-FeOOH}$	De amarillento a rojizo, marrón oscuro y casi negro		19

Las características que presentan tanto los óxidos como los oxihidróxidos de hierro, su estabilidad química y alto contenido en hierro los hace excelentes candidatos para la adsorción de arsénico del agua. A continuación, se presentan algunas investigaciones realizadas con óxidos e hidróxidos de hierro.

## **2.1 Adsorbentes a base de hematita, magnetita, goetita y hierro de valencia cero**

Los óxidos de hierro más utilizados en remoción de arsénico del agua, son la hematita ( $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ), maghemita  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  y la magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), ya que estos poseen una estructura polimórfica y una alta área superficial, lo que les hace ser idóneos como adsorbentes (Lu et al., 2011; Barrena, 2018).

Pajany et al. (2009) realizaron un estudio referente a la adsorción de As (V), sobre dos óxidos de hierro comerciales (hematita y goetita) considerando parámetros fisicoquímicos como el pH y la fuerza iónica. Los resultados del estudio mostraron que a pH ácidos la retención de arsénico fue alta, mientras que a valores de pH alcalinos fue baja. A valores de pH correspondientes al del agua natural, la hematita y goetita tienen una capacidad de adsorción superior al 80%, independientemente de la concentración inicial y la fuerza iónica. Otro de los estudios realizados por Pajany et al. (2011), fue enfocado a la adsorción de arsénico (V) en diferentes condiciones físico-químicas sobre cuatro adsorbentes comerciales (hematita, goetita, magnetita y hierro de valencia cero (ZVI)). La adsorción de arsénico (V) fue más eficiente en hematita, ya que es altamente eficaz en pH altos y concentración de arsénico. Karanac et al. (2018) estudiaron la modificación de la superficie de las cenizas volantes de desecho con magnetita para la eliminación de arseniato. La capacidad de adsorción en el primer ciclo fue de  $19.14 \text{ mg g}^{-1}$ , y después de cinco ciclos de impregnación del adsorbente, se tuvo una capacidad de  $65.78 \text{ mg g}^{-1}$ . Shahid et al (2018) realizaron la síntesis de partículas de magnetita para remover As (V) a un pH 6, teniendo un máximo de adsorción de  $7.69 \text{ mg}$  de arseniato en  $1 \text{ g}$  de magnetita. Las partículas de magnetita fueron eficientes, regenerándose hasta cinco ciclos, con limpieza alcalina.

## 2.2 Adsorbentes a base de nanopartículas de magnetita y maghemita

Iconaru et al. (2016) llevaron a cabo una investigación de la adsorción de arsénico y cromo por nanopartículas mixtas de magnetita y maghemita en la suspensión acuosa. El estudio mostró que la remoción del arsénico y cromo del agua contaminada depende en gran medida del pH, tiempo de contacto, concentración inicial de arsénico y cromo. Las nanopartículas de magnetita-maghemita tenían una mayor afinidad a arsénico que al cromo (VI), logrando adsorber de un 96 a 99% de arsénico, en un pH de 2. Sin embargo, al incrementar la concentración de fosfato, la adsorción tanto del arsénico como del cromo disminuyó. Nanopartículas de magnetita sintética ( $n\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) fueron aplicadas para rastrear elementos de tierras raras y posible aplicación en adsorción de arsénico y cobre. Las nanopartículas lograron adsorber  $66.53 \text{ mg g}^{-1}$  de arsénico del agua.

## 2.3 Adsorbentes a base de nanopartículas de magnetita y maghemita

Monarrez-Cordero et al. (2017) desarrollaron un compuesto de magnetita dopada de aluminio de alta calidad (MNP). Los experimentos de adsorción mostraron que los iones de arsénico (III y V) pueden ser eliminados con una eficiencia del 100% en poco tiempo. Así mismo, los resultados demostraron que la eliminación de iones de fluoruro también fue eficiente, debido a que los MNP dopados tienen una gran capacidad de adsorción por la presencia de aluminio, el cual tienen una afinidad por fluoruro y arsénico.

Flores et al. (2018) investigaron y desarrollaron nanocompuestos, los cuales fueron preparados por envejecimiento, para disminuir la concentración de arsénico (V) en agua dura de 10 ppm a 10 ppb mediante el proceso de adsorción. El compuesto mostró gran capacidad de adsorción de arsénico frente a su bajo costo de material. Prasanta et al. (2014) estudiaron la nanopartículas de óxido de hierro policristalino no magnético con morfología similar a una flor, como un adsorbente efectivo para eliminar As (III) de  $300 \mu\text{g L}^{-1}$  a menos de  $10 \mu\text{g L}^{-1}$  del agua potable en un amplio



rango de pH. La caracterización de las nanopartículas obtenidas se realizó mediante análisis de difracción de rayos X en polvo (DRX), área de superficie BET, imágenes FTIR, Los resultados arrojados demostraron que material se puede regenerar hasta un 70% utilizando ácido clorhídrico diluido que se utilizará para fines de desarsenificación.

#### **2.4 Adsorbentes a base de oxihidróxidos de hierro**

Los oxihidróxidos de hierro tienen un comportamiento como coloides positivos, por lo cual tiene la capacidad de fijar por adsorción a aniones complejos. Entre estos aniones se destacan las especies As ( $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$ ,  $\text{AsO}_4^{3-}$ ,) debido a su peligrosidad. Algunos de los estudios realizados sobre este tipo de compuestos se mencionan a continuación.

Glocheux et al. (2015) optimizaron materiales a base de oxihidróxido de Fe y Al, producidos con coagulantes de grado industrial para determinar los efectos del pH sobre la capacidad de adsorción de arsénico. Los estudios arrojaron que el pH fue determinante en la adsorción de arsénico, ya que a pH altos obtuvieron mayor eficiencia de adsorción de As (V), mientras que, a pH bajos de la adsorción de As (III). Así mismo, ellos determinaron que la presencia de grupos fosfatos en los materiales incrementó la adsorción de As (III).

Lakshmipathiraj et al. (2016) realizaron experimento por lotes para estudiar la adsorción de especies de As(III) y As(V) sobre oxihidróxidos de hierro sustituidos con Mn (MIOH). Mediante un análisis con difracción de rayos X (DRX), los autores concluyeron que la muestra presentó un área de superficie de  $101 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$  y un volumen de poros de  $0.35 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$ . y que la mayor capacidad de adsorción de As (III) fue de  $4.58 \text{ mg g}^{-1}$ , mientras la de As (V) fue de  $5.72 \text{ mg g}^{-1}$ .

Por su parte, Renard et al. (2017) estudiaron un proceso acoplado de disolución de siderita en fluidos acuosos ácidos en presencia de arsénico, utilizando microscopía de fuerza atómica *in situ* para reducir el área de superficie disponible para disolución. El arsénico fue adsorbido por oxihidróxidos de hierro y su presencia no cambió significativamente la velocidad de disolución-precipitación del proceso en general.

Lin et al. (2018) utilizaron FeOOH en la modificación de un polvo de raíz biodegradable (*Eicchorni crassipes*) para obtener un mayor rendimiento de adsorción de arsénico del agua. Los experimentos de cinética y termodinámica de adsorción mostraron que la modificación del polvo de raíz con FeOOH (RPM9), incrementó la capacidad de adsorción de arsénico. Además, RPM9 podía ser usado durante seis ciclos, antes de disminuir la capacidad de adsorción.

Ramírez et al. (2018) estudiaron la adsorción de arsénico en soluciones acuosas utilizando como adsorbente un compuesto a base de goetita-poliacrilamida mediante procesos discontinuos y continuos. Este compuesto tuvo una capacidad de adsorción de  $1.22 \text{ mg g}^{-1}$ , mucho mayor al comparar con el polvo del goetita. Los experimentos demostraron que este compuesto es capaz de tratar 400 veces más de agua.

### **3. Conclusiones**

- Los óxidos y oxihidróxidos de hierro son extensamente empleados por su eficiencia en la eliminación de arsénico de medios acuosos logrando una capacidad de adsorción que oscila entre un 70 a un 99%, lo cual se debe a que poseen elevada área superficial específica y una gran porosidad.

- La disponibilidad de los óxidos e hidróxidos de hierro es alta y el proceso de síntesis es práctico, además de ser fácilmente recuperado mediante magnetismo, en el caso de la magnetita.

#### 4. Referencias

Acuña Piedra, A., Araya Obando, & Romero Esquivel, L. (2016). Selección teórica de adsorbentes potenciales naturales de bajo costo para la remoción de arsénico en el agua de consumo humano en Costa Rica. *Tecnología en Marcha*, 29: 23-34.

Askari, P., Faraji, A., Khayatian, G., Mohebbi, S. (2017). Effective ultrasound-assisted removal of the heavy metal ions As (III), Hg (II), and Pb (II) from aqueous solution by new MgO/CuO and MgO/MbO<sub>2</sub> nanocomposites. *Journal of the Iranian Chemical Society*, 14(3): 613- 621.

Barrena, J. C. (2018). Síntesis y caracterización de nanopartículas de óxidos de hierro. (Trabajo de grado). ETS. de Ingeniería Industrial, Informática y de Telecomunicación, Pamplona.

Flores, H. H., Pariona, N., Herrera Trejo, M., Hernández García, H., Martínez Enriquez, A. (2018). Concrete/maghemite nanocomposites as novel adsorbents for arsenic removal. *Journal of Molecular Structure*, 1171: 9-16.

Glocheux, Y.; Albadarin, A. B.; Mangwandi, C.; Stewart, E., Walker, G. M. (2015). Production of porous aluminium and iron sulphated oxyhydroxides using industrial grade coagulants for optimised arsenic removal from groundwater. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 25: 56-66.

<http://noticias-ambientales-argentina.blogspot.com/2013/08/la-contaminacion-con-arsenico-en.html>.  
Hua, J. (2018). Adsorption of low-concentration arsenic from water by co-modified bentonite whit manganese oxides and poly (dimethyldialylammonium chloride). *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6 .156-168.

Iconaru, S. L., Guégan, R., Popa, C., IMotelica Heino, M., Steluta Ciobanu,C., Predoi, D. (2016). Magnetite (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) nanoparticles as adsorbents for As. *Applied Clay Science*, 134:128–135.

Jadhav, S. V., Bringas, E., Yadav, G. D., Rathod V. K., Ortiz, I., Marathe, K. V. (2015). Arsenic and fluoride contaminated groundwaters: A review of current technologies for contaminants removal. *Journal of Environmental Management*, 162: 306 -325.

Karanac, M., Đolić, M., Veličković, Z., Kapiđžić, A., Ivanovskib, V., Mitrić, M., Marinković, A. ( 2018 ). Efficient multistep arsenate removal onto magnetite modified fly ash. *Journal of Environmental Management*, 224: 263-276.

Lakshmipathiraj, P. V., Narasimhan, B. R., Prabhakar, S., Bhaskar Raju, G. (2006). Adsorption studies of arsenic on Mn-substituted iron oxyhydroxide. *Journal of Colloid and Interface Science*, 304: 317–322.

Lin, S., Yang, H., Na, Z., Lin, K. (2018). A novel biodegradable arsenic adsorbent by immobilization of iron. *Chemosphere*, 192: 258-266.

López, M. (2013). Adsorción de arsénico y fluoruros en nanopartículas y su posterior separación del agua tratada. Tesis de doctorado en ciencias en materiales. Centro de investigación en Materiales Avanzados, S.C: División de Estudios de Posgrado. México.131 p.

Lu, B., Guo, H., Li, P., Liu, H., Wei, Y., Hou , D. (2011). Comparison study on transformation of iron oxyhydroxides: . *Journal of Solid State Chemistry*, 184: 2139–2144.

Luo, X., Wang, C., Luo, S., Dong, R., Tu, X., Zeng, G. (2012). Adsorption of As (III) and As (V) from water using magnetite Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-reduced graphite oxide–MnO<sub>2</sub> nanocomposites. *Chemical Engineering Journal*, 187: 45– 52.

Monarrez-Cordero, P., Amezaga-Madrid, L., Fuentes-Cobas, M. E., Montero-Cabrera, M., Yoshida, M. (2017). High and fast adsorption efficiency of simultaneous As 3, As 5 and F by Al-doped magnetite synthesized vía AACVD B.E. *Journal of Alloys and Compounds*, 718: 414-424.

Nicomel, N. R., Leus, K., Folens, K., Van Der Voort, P., Du Laing, G. (2016). Technologies for Arsenic Removal from Water. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 13(1): 1-24.

Pajany, Y. M., Hurel, C., Marmier , N., Roméo, M. (2009). Arsenic adsorption onto hematite and goethite. *Desalination*, 12: 876-881.

Pajany, Y. M., Hurel, C., Marmier, N., Roméo, M. (2011). Arsenic (V) adsorption from aqueous solution onto goethite, hematite, magnetite and zero-valent iron: Effects of pH, concentration and reversibility. *Desalination*, 281: 93–99.

Pashley, F. M., Pashley, R. M. (2015). A study of ion adsorption onto surface functionalized silica particles. *Chemical Engineering Journal*, 262. 119–124.

Pintor, A., Boaventura, R. A., Botelho, C. M. (2017). Arsenic removal from water using iron-coated seaweeds. *Journal of Environmental Management*, 192: 224-233.

Prasanta, K. R., Devi, R. R., Umlong, I. M., Thakur, A. J., Banerjee, S., Veer, V. (2014). Iron oxide hydroxide nanoflower assisted removal of arsenic. *Materials Research Bulletin*, 49: 360–368.

Ramírez Muñiz, K., Perez Rodriguez, F., Rangel Mendez, R. (2018). Adsorption of arsenic onto an environmental friendly goethite-polyacrylamide composite. *Journal of Molecular Liquids*, 264: 253–260.

Renard, F., Putins, C., Montes Hernández, G., King, H. (2017). Siderite dissolution coupled to iron oxyhydroxide precipitation in the presence of arsenic revealed by nanoscale imaging. *Chemical Geology*, 449: 123-134.

Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (1994) Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-1994 Salud Ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamiento. <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/m127ssa14.html>. fecha de consulta: octubre 2018.9.

Shahid, M. K., Phearom, S., Choi, Y. G. (2018). Synthesis of magnetite from raw mill scale and its application. *Chemosphere*, 203: 90-95.

Singh, R., Singh, S., Parihar, P., Pratap Singh, V., Prasad, S. (2015). Arsenic contamination, consequences and mediation techniques. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 112: 247–270.

Tresintsi, S., Simeondis, K., Vourlias, G., Stavropoulos, G., Mitrakas, M. (2012). Kilogram-scale synthesis of iron oxy-hydroxides with improved arsenic removal capacity: study of Fe(II) oxidation--precipitation parameters. *Water Research*, 46(16): 5255-5267.