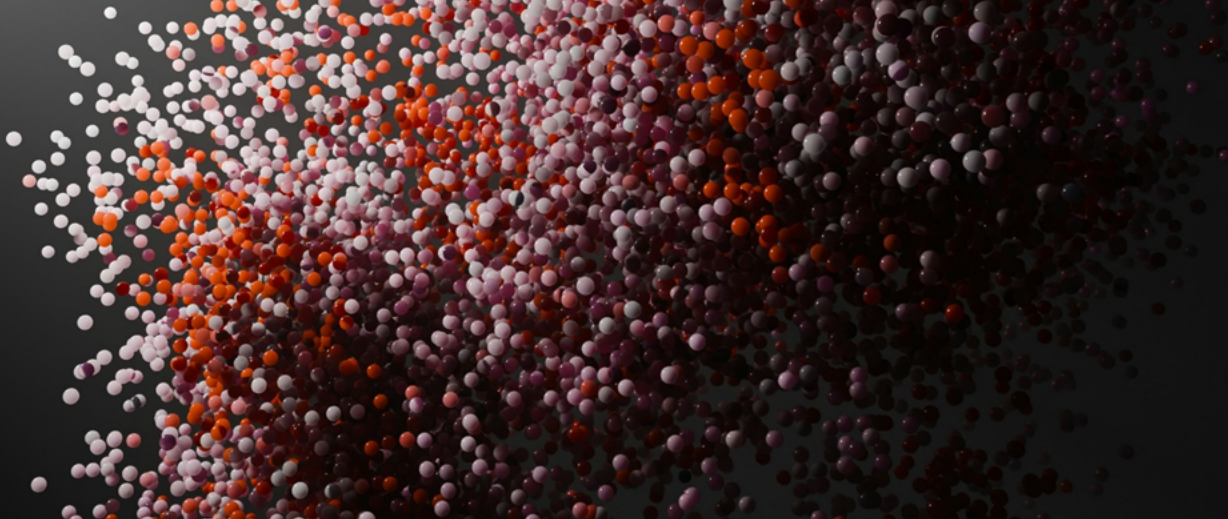




Eliminación mejorada de arsénico de agua subterránea mediante nanopartículas de óxido de hierro soportadas en xerogeles de carbono (xerogeles magnéticos)

Sasirot Khamkure^{1*}, Victoria Bustos-Terrones², Audberto Reyes-Rosas³

¹CONAHCYT-Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, ²Universidad Politécnica del Estado de Morelos y ³Centro de Investigación en Química Aplicada.

*skhamkure@conahcyt.mx

Resumen

El consumo de agua contaminada con arsénico proveniente de aguas subterráneas en México y puede causar efectos adversos para la salud, incluso en bajas concentraciones. La evaluación de la capacidad de adsorción de arseniato y arsenito en muestras de agua subterránea, mediante la aplicación de nanopartículas de óxido de hierro (obtenidas por el método técnica sol-gel y soportadas sobre xerogeles de carbono por medio de sonicación indirecta), contribuye a encontrar nuevas alternativas para el tratamiento de aguas contaminadas con este metaloide, lo que podría reducir el impacto negativo en la salud humana y ambiental.

Palabras clave: adsorción, arseniato, arsenito, carbonización, adsorbente magnético.

Introducción

El arsénico, un metaloide peligroso, puede estar presente de manera natural en altos niveles de concentración en aguas subterráneas, con potencial de riesgo para la salud pública. Esto se debe a que exhibe el comportamiento geoquímico normal de los metaloides formadores de oxianiones en el ambiente superficial¹. El arsénico se encuentra principalmente en las aguas subterráneas debido a su presencia natural en la corteza terrestre. Los procesos geológicos, hidrogeológicos y geoquímicos, particularmente en regiones áridas y semiáridas, contribuyen a esta distribución².

En este trabajo se realizó una recopilación, análisis e integración de información sobre los acuíferos sobre-explotados en México para determinar su estado actual. La ocurrencia de arsénico en aguas subterráneas se analizó con ayuda del sistema de información geográfica (SIG) ArcGIS y el *software* estadístico R v3.5. La figura 1 ilustra la detección de contaminación por arsénico en los suministros de agua de varias regiones de México. En el norte, el centro y centro-oeste; particularmente en las regiones áridas y semiáridas, los niveles de superan el máximo permisible de contaminante (MCL) de arsénico en el agua potable establecido tanto por la norma mexicana NOM-127-SSA1-2021 como por la Organización Mundial de la Salud, que son 10 µg/L.

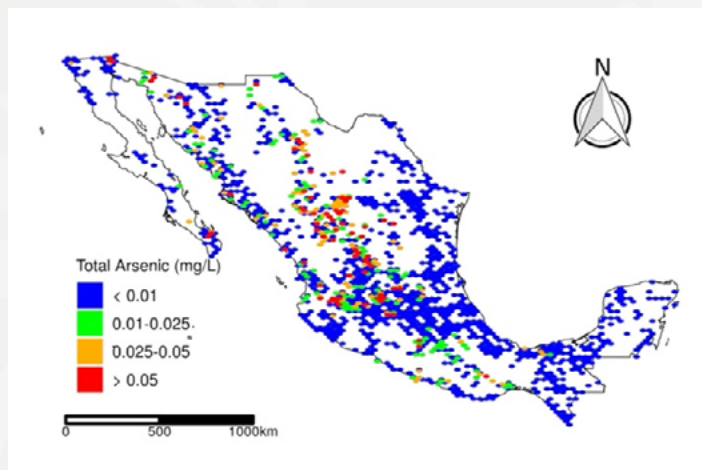


Figura 1 Concentraciones de arsénico en aguas subterráneas en México³.

Por otro lado, los geles son materiales porosos que han captado la atención por sus propiedades de textura, resistencia mecánica y estabilidad química, las cuales pueden ser controladas al variar las condiciones de síntesis. Los geles utilizados en este trabajo se obtuvieron en tres pasos: síntesis, secado y pirólisis del xerogel orgánico⁴. El gel resorcinol/formaldehído tiene una aplicación específica en la remoción de contaminantes del agua potable y aguas residuales^{5,6,7}. Esta investigación se centra en la generación de nanopartículas de óxido de hierro soportadas en xerogel de carbono (xmc) que puedan ser recuperadas fácilmente del medio acuoso. Estos materiales son capaces de remover el arsénico que se encuentra en los pozos de aguas subterráneas, las cuales son usadas para abastecer a gran parte de la población.

Metodología

Los xmc fueron sintetizados a partir de la polimerización de sol-gel del resorcinol ($C_6H_6O_2$, R) y el formaldehído (CH_2O , F) utilizando carbonato de sodio (Na_2CO_3 , C) como catalizador. Esta es una metodología de preparación simple y de bajo costo⁸. Se trabajaron las siguientes relaciones molares: $R/F=0.5$, $R/C=100$, $R/W=0.04$ y $M/R=0.07$. Para la carbonización de los xerogeles magnéticos, se usó un horno de tubo (Lindberg /Blue, modelo STF55346C-1) a temperatura de 600 °C y rampa de calentamiento de 3 °C/min durante 6 h con flujo de nitrógeno de 100 mL/min. En este estudio se sintetizaron nanopartículas de magnetita (Fe_3O_4) vía dos métodos modificados: coprecipitación y oxidación convencional según el método reportado previamente⁹. Estos

materiales fueron activados (se modificó su superficie usando H_2O_2) y se identificaron como XMC10-600M y XMO6-600M, respectivamente.

La morfología de la superficie y la estructura porosa de los xmc se analizó con un microscopio electrónico de barrido ambiental (FEI-ESEM-QUANTA 200).

Finalmente, se evaluó la adsorción de arsénico sobre los geles preparados en un sistema de agua sintética y otro con agua subterránea.

Resultados y discusión

La figura 2 muestra las micrografías SEM de los geles preparados. Las figuras 2a y 2b corresponden al material identificado como XMO6-600M; en ellas se observan partículas con tamaños de poros más grandes, pero con una distribución homogénea. Las figuras 2c y 2d evidencian la morfología del material XMC10-600M, el cual presenta una distribución uniforme de un gran número de microclústeres, formando una estructura tridimensional (3D) y dando lugar a materiales porosos, que son adecuados para aplicaciones de adsorción⁴. Además, los resultados del análisis del EDX confirmaron que el porcentaje de contenido de Fe en ambos XMO6-600M y XMC10-600M es de 16.66 % y 21.40 %, respectivamente. Aunque se prepararon con la misma relación molar de $M/R = 0.07$.

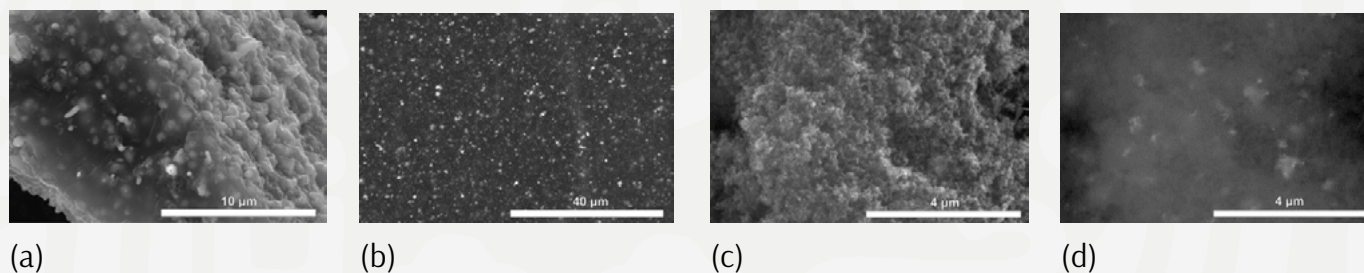
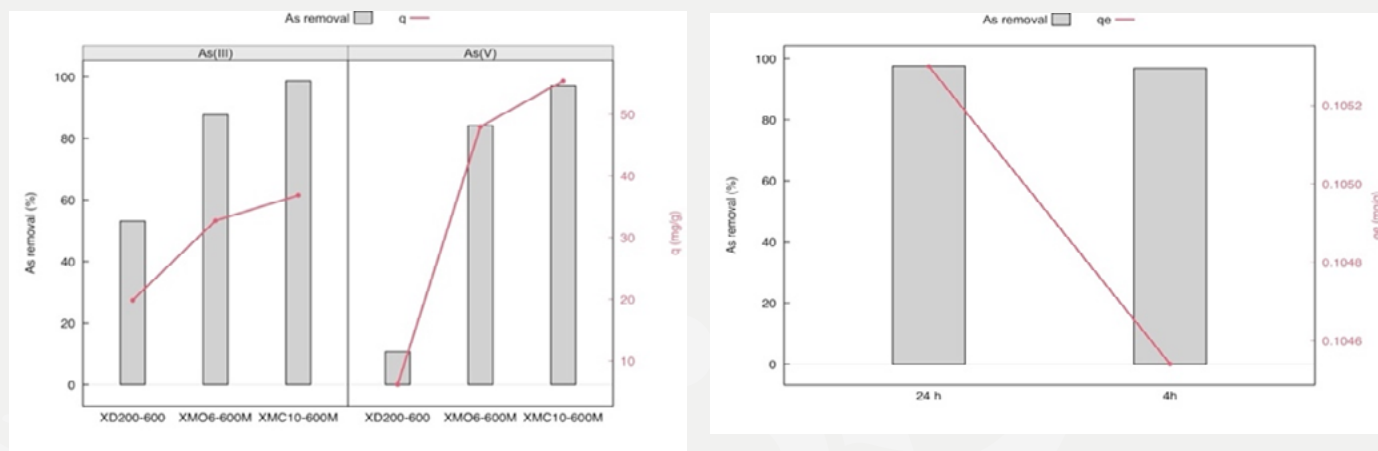


Figura 2 Imágenes de microscopía electrónica de barrido (SEM) y electrones retrodispersados (BSE) de (a, b) XMO6-600M y (c, d) XMC10-600M, respectivamente.

La figura 3a muestra los resultados de adsorción de $As(III)$ y $As(V)$ en el agua sintética, utilizando XMC10-600M como adsorbente. En ella, se observa un porcentaje de remoción mayor que para XMO6-600M, así como un porcentaje de hierro alto en comparación con los otros materiales. En cuanto a la incorporación de las nanopartículas de Fe_3O_4 en los geles¹⁰, informan que la estructura y morfología finales de los xerogeles de carbono aumentaron los volúmenes de los meso y macroporos. La figura 3b muestra que la capacidad de adsorción de arsénico presente en aguas subterráneas a partir de XMC10-600M en dos tiempos de contacto, 4 h y 24 h, permite cumplir con los límites máximos permisibles establecidos en la NOM-127-SSA1-2021.



(a) (b)

Figura 3. Efecto del pH (3 y 5) sobre la eliminación de As(III) y As(V) en agua sintética (a), y efecto del tiempo de contacto (4 h y 24 h) en agua subterránea (b).

Conclusión

Las nanopartículas de óxido de hierro (magnetitas) soportadas en xerogel de carbono son capaces de remover las concentraciones de arsénico presente en los pozos de aguas subterráneas de México cuya presencia se ha detectado en mantos acuíferos sobreexplotados. El tamaño de la nanopartícula y el contenido de Fe está fuertemente relacionado con la adsorción del arsénico, aduciendo que las partículas de menor tamaño permiten incrementar la capacidad de adsorción de arsénico.

Referencias bibliográficas

1. Valskys, V., Hassan, H. R., Wołkowicz, S., Satkūnas, J., Kibirkštis, G., & Ignatavicius, G. (2022). A review on detection techniques, health hazards and human health risk assessment of arsenic pollution in soil and groundwater. *Minerals*, 12(10), 1326. <https://doi.org/10.3390/min12101326>
2. Alarcón-Herrera, M. T., Martín-Alarcon, D. A., Gutiérrez, M., Reynoso-Cuevas, L., Martín-Domínguez, A., Olmos-Márquez, M. A., & Bundschuh, J. (2020). Co-occurrence, possible origin, and health-risk assessment of arsenic and fluoride in drinking water sources in Mexico: Geographical data visualization. *The Science of the Total Environment*, 698(1433), 134168. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134168>
3. CONAGUA. (2019). *Sistema Nacional de Información del Agua (SINA): Agua en el mundo, México*. <https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/>
4. Canal-Rodríguez, M., Menéndez, J. A., & Arenillas, A. (2018). Carbon Xerogels: The Bespoke Nanoporous Carbons. En T. H. Ghrif (Ed.), *Porosity: Process, Technologies and Applications*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.71255>

5. Gaumet, A. V., Caddeo, F., Loche, D., Corrias, A., Casula, M. F., Falqui, A., & Casu, A. (2021). Magnetic Study of CuFe_2O_4 - SiO_2 Aerogel and Xerogel Nanocomposites. *Nanomaterials*, 11(10), 2680. <https://doi.org/10.3390/nano11102680>
6. Kumar, A., Prasad, S., Saxena, P. N., Ansari, N. G., & Patel, D. K. (2021). Synthesis of an alginate-based Fe_3O_4 - MnO_2 xerogel and its application for the concurrent elimination of Cr(VI) and Cd(II) from aqueous solution. *ACS Omega*, 6(5), 3931-3945. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c05787>
7. Ribeiro, R. S., Frontistis, Z., Mantzavinos, D., Venieri, D., Antonopoulou, M., Konstantinou, I. K., Silva, A. M., Faria, J. L., & Gomes, H. T. (2016). Magnetic carbon xerogels for the catalytic wet peroxide oxidation of sulfamethoxazole in environmentally relevant water matrices. *Applied Catalysis B-environmental*, 199, 170-186. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2016.06.021>
8. Pekala, R. W. (1989). Organic aerogels from the polycondensation of resorcinol with formaldehyde. *Journal of Materials Science*, 24(9), 3221-3227. <https://doi.org/10.1007/bf01139044>
9. Khamkure, S., Bustos-Terrones, V., Benitez-Avila, N. J., Cabello-Lugo, M. F., Gamero-Melo, P., Garrido-Hoyos, S. E., & Esparza-Schulz, J. M. (2022). Effect of Fe_3O_4 nanoparticles on magnetic xerogel composites for enhanced removal of fluoride and arsenic from aqueous solution. *Water Science and Engineering*, 15(4), 305-317. <https://doi.org/10.1016/j.wse.2022.07.001>
10. Kiciński, W., Szala, M., & Nita, M. (2011). Structurally tailored carbon xerogels produced through a sol-gel process in a water-methanol-inorganic salt solution. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 58(1), 102-113. <https://doi.org/10.1007/s10971-010-2362-y>