

## Estudio de equilibrio de la adsorción de arsénico en suelo modificado Study of the adsorption equilibrium of arsenic in modified soil

Aguayo Hernández Laila Danae<sup>1</sup>, Gurrola Saldaña Fernanda Beatriz<sup>2</sup>, Gutiérrez Vázquez Juan Aaron<sup>1</sup>, Herrera Acosta Andrés<sup>2</sup>, Damián-Ascencio César Eduardo<sup>3</sup>, Saldaña-Robles Adriana<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Ambiental, División Ciencias de la Vida, Campus Irapuato Salamanca, Universidad de Guanajuato

<sup>2</sup>Departamento de Ingeniería Agrícola, División Ciencias de la Vida, Campus Irapuato Salamanca, Universidad de Guanajuato

<sup>3</sup>Departamento de Ingeniería Mecánica, División de Ingenierías, Campus Irapuato Salamanca, Universidad de Guanajuato  
cesar.damian@ugto.mx<sup>3</sup>, adriana.saldaña@ugto.mx<sup>2</sup>

### Resumen

La presencia de arsénico en el agua es preocupante debido a su toxicidad. Por ello, comprender su impacto en la salud pública y el medio ambiente es crucial. La remoción efectiva de arsénico es vital para garantizar el suministro seguro de agua potable. Investigaciones sobre métodos de remoción, como la adsorción en materiales específicos o procesos de oxidación, son fundamentales. Los materiales naturales, como el suelo, son excelentes adsorbentes debido a su composición diversa y estructura porosa. La arcilla y la materia orgánica presentes en el suelo tienen una gran capacidad de adsorción debido a sus áreas superficiales y cargas eléctricas. Estos materiales pueden adsorber contaminantes orgánicos e inorgánicos, incluido el arsénico, a través de interacciones físicas y químicas. La abundancia y accesibilidad del suelo lo convierten en un recurso valioso para la remoción de contaminantes en aplicaciones medioambientales y de tratamiento de aguas. Además, la modificación del suelo ofrece una solución efectiva y sostenible para la remoción de arsénico, eficaz, de bajo costo y sostenible, lo que lo hace un adsorbente especialmente atractivo para la purificación del agua en comunidades rurales y regiones en desarrollo.

**Palabras clave:** Arsénico, adsorción, suelo.

### Introducción

El arsénico (As) es un elemento natural de la corteza terrestre, se deriva de fuentes geológicas, como la erosión de rocas o las emisiones de volcanes, también puede originarse por actividades humanas, como la minería, la fundición de metales o su empleo en pesticidas y preservadores de madera (Bundschuh, 2008) (Armienta et al., 1996), lo cual causa contaminación y ésta se puede presentar en el aire, el agua y el suelo. Lo cual ha convertido el As en un problema a nivel mundial, y diversos países han reportado concentraciones de As que pasan el límite establecido por la organización mundial de la salud (Saldaña-Robles, A. et al., 2017). El As en las aguas subterráneas es un problema importante a nivel mundial, que socava significativamente países como Bangladesh, India, México y algunas áreas de los Estados Unidos. Por ejemplo, en Bangladesh, se considera que millones de personas desarrollan niveles de arsénico más altos de lo recomendado por la Organización Mundial de la Salud (OMS), lo que ha llevado a una crisis de salud pública por enfermedades relacionadas con la exposición generalizada. En la India, la situación es igualmente alarmante, con áreas como Bengala Occidental y Bihar que sufren niveles crónicos. Asimismo, en ciertas regiones de México y los Estados Unidos, en particular el norte-centro de México y suroeste de Estados Unidos, también experimentan graves problemas debido a la contaminación natural y antropogénica. Hasta 43 millones de estadounidenses pueden estar expuestos a cantidades de As que exceden los niveles permisibles, la presencia de As en las aguas subterráneas se atribuye a procesos naturales, como la lixiviación de rocas que contienen grandes cantidades de arsénico, por lo que pueden empeorarse por la industria y la minería, así como por sustancias químicas como los plaguicidas que contienen este metal (EPA, 2022).

El As es extremadamente tóxico en su forma inorgánica, y su exposición puede ser peligrosa para la salud de todas las personas y ecosistemas (Londoño-Franco, L. F. et al., 2016), por lo cual la WHO definió un valor para la regulación y la normalización a nivel mundial, el cual es de 10  $\mu$ g/L. Por lo que se recomienda que las concentraciones se mantengan al por debajo de este valor de referencia (World Health Organization, 2022). Para cumplir con las medidas para abordar el problema del As en el agua, es necesario monitorear constantemente los niveles en el agua e implementar sistemas de tratamiento del agua para eliminar el exceso de estos y hacerla potable. Es crucial informar al público sobre los peligros asociados con el agua

que contiene altos niveles de As y tomar medidas preventivas. Por otro lado, se requiere más investigación científica para comprender mejor el impacto del As en la salud y desarrollar estrategias efectivas para minimizar sus efectos. (World Health Organization, 2023)

Debido a lo anterior, la remoción de As del agua es una preocupación importante y se han desarrollado varias tecnologías para la remoción de As, cada una con sus ventajas y desventajas, algunas de las más utilizadas son; a) Adsorción: Se utilizan materiales como, geológicos, carbón activado, alúmina activada, y otros adsorbentes específicos que tienen una alta afinidad por el arsénico. Ventajas: Relativamente sencillo, puede ser económico. Desventajas: Los medios adsorbentes pueden saturarse rápidamente, requiriendo reemplazo o regeneración, b) Intercambio iónico: Utiliza resinas de intercambio iónico para reemplazar los iones de arsénico con otros iones no tóxicos. Ventajas: Eficiente para bajos niveles de arsénico. Desventajas: Sensible a la presencia de otros iones en el agua, puede ser costoso. c) Precipitación química y coagulación-floculación: Se añaden productos químicos (como sulfato férrico o cloruro férrico) que reaccionan con el arsénico para formar compuestos insolubles que se pueden remover por sedimentación o filtración. Ventajas: Eficaz para la remoción de arsénico a niveles bajos. Desventajas: Genera lodos que deben ser manejados adecuadamente. d) Filtración por membranas: Incluye técnicas como la ósmosis inversa, la nanofiltración y la ultrafiltración. Ventajas: Alta eficiencia en la remoción de arsénico y otros contaminantes. Desventajas: Costos elevados de operación y mantenimiento, puede requerir pretratamiento del agua. e) Electrocoagulación: Utiliza una corriente eléctrica para disolver electrodos metálicos en el agua, que luego forman compuestos que coagulan el arsénico. Ventajas: Eficiente y puede tratar grandes volúmenes de agua. Desventajas: Requiere energía eléctrica y puede generar lodos metálicos. f) Biorremediación: Utiliza microorganismos que pueden metabolizar o inmovilizar el arsénico. Ventajas: Método ecológico y puede ser de bajo costo. Desventajas: Aún en desarrollo y puede tener limitaciones en cuanto a la velocidad de tratamiento y condiciones específicas necesarias.

La adsorción sobre materiales geológicos es el proceso en el que los átomos o moléculas de una sustancia que se encuentran en una fase líquida se depositan en la superficie de otra sustancia que se encuentra en fase sólida, por lo que en este trabajo, las moléculas de As se adhieren a la superficie de las partículas del suelo modificado, este proceso es importante para la remediación de agua contaminada con arsénico, lo cual reduce su biodisponibilidad y lo hace menos accesible para plantas y organismos vivos (Rodríguez et al., 2003).

Una forma eficaz, ecológica y viable de mitigar esta fuente de contaminación implica modificar la capacidad de los materiales naturales, como el suelo, para abstraer arsénico del agua. Los suelos pueden ser tratados a través de la adición de ciertos compuestos para generar una mayor afinidad por el As. Por ejemplo, la adición de óxidos de hierro, como goetita y hematita, demostró ser especialmente eficaz en trabajos de campo y laboratorio. Los óxidos de hierro también pueden funcionar mediante la formación de complejos con As, lo que lo sujeta en un arreglo no móvil en la columna de agua subterránea. Además, los estudios recientes encontraron que pueden modificarse para implementarse en el biochar, que es un carbón vegetal fabricado a partir de desechos agrícolas (Smith J. et al., 2023).

Los suelos modificados se pueden utilizar en sistemas de filtración tanto a pequeña como a gran escala, asegurando que el agua sea tratada antes de ser consumida. La implementación de sistemas de filtración comunitarios que utilizan suelos alterados en las zonas rurales de Bangladesh y la India ha dado lugar a una mejora significativa en la calidad del agua. Además, estas técnicas se consideran respetuosas con el medio ambiente y económicas en comparación con tecnologías más sofisticadas y costosas como la ósmosis inversa y los sistemas de intercambio iónico. El método no sólo reducirá la concentración de arsénico en el agua subterránea, sino que también mejorará la salud pública y proporcionará agua potable segura (Gomez, R. et al., 2021). Por lo cual el presente trabajo pretende modificar un suelo de la región del Bajío con óxidos de hierro para aumentar la capacidad de adsorción de As en el agua.

## Metodología

Modificación química del suelo con óxido de hierro. Un suelo seco y tamizado fue lavado hasta obtener pH estandarizado y posteriormente secado, dispersando este en agua destilada, al cual se le ajustó el pH a 3.5 para después añadir una solución de nitrato férrico 0.1 M al mismo pH, manteniéndolo en agitación durante 2 h, para luego aumentar gradualmente su pH a 9 y secar en estufa a 60 °C durante 72 h (L. Borgnino et al., 2009)

**Solución de As.** Se preparó un litro de solución madre de As de 5 mg/L y a partir de esta se prepararon concentraciones de 0.1 mg/L, 0.3 mg/L, 0.6 mg/L, 0.9 mg/L, 1.2 mg/L y 1.5 mg/L de As.

**Isotermas de adsorción de As.** Se realizaron 3 isotermas de adsorción a 25, 35 y 45 °C para suelo modificado químicamente y 1 isoterma de adsorción para suelo sin modificar a 45 °C, cada isoterma consta de 7 puntos considerando el blanco (las concentraciones de As utilizadas para cada punto se mencionaron en el párrafo anterior), todas la isotermas se realizaron por duplicado para pH 4 y 6. Se agregaron 45 mL de la solución correspondiente (anteriormente mencionada) a cada punto en tubos falcón de 50 mL. Se pesó y adicionó 0.1 g de suelo modificado químicamente a cada tubo falcón. Posterior a esto se pusieron en agitación a 25 °C, 35 °C y 45 °C durante 24 h, durante el tiempo de agitación se registró el pH de cada tubo y se ajustó respectivamente al pH inicial (4 o 6). Después de 24 h se retiró el sobrenadante de cada tubo para realizar el análisis de As correspondiente. El proceso antes mencionado se esquematiza en la Figura 1.

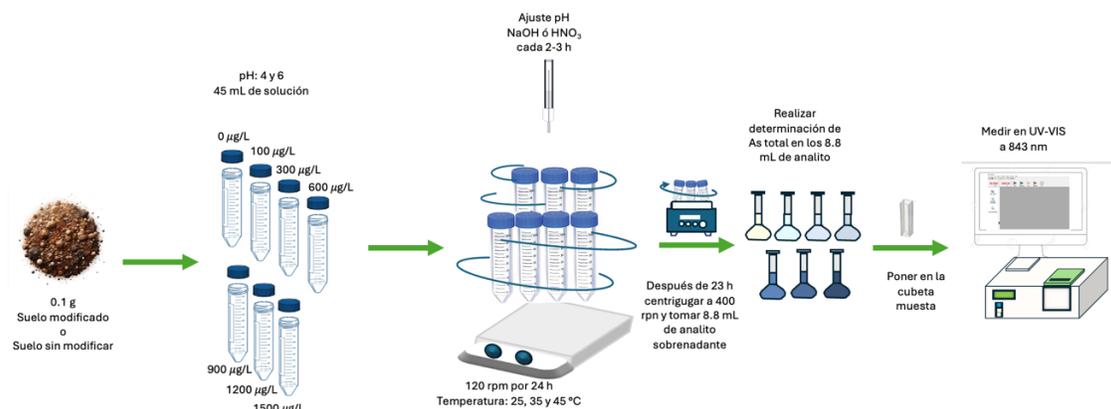


Figura 1. Preparación de isotermas con suelo modificado y suelo no modificado.

## Acondicionamiento de la muestra para determinación de As

**Preparación de Reactivos:** (a) Para el Agente A, se pesan 10.4 g de molibdato de amonio, 0.0176 g de tartrato de antimonio potásico y se agregan a 30.6 mL de agua destilada con 29.4 mL de ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) 9 mol/L en un matraz aforado de 100 mL y se diluyen con agua destilada hasta aforar. Esta solución se almacena en un recipiente de color ámbar. (b) Para la solución oxidante de permanganato de potasio (KMnO<sub>4</sub>) se disuelven 0.0063 g de KMnO<sub>4</sub> en 50 mL de agua destilada. Esta solución de KMnO<sub>4</sub> también se almacena en un frasco ámbar. (c) Para el ácido ascórbico (solución generadora del cromóforo) se agregan 1.08 g de ácido ascórbico (C<sub>6</sub>H<sub>8</sub>O<sub>6</sub>) en 10 mL de agua destilada en matraz aforado, se disuelve hasta obtener una tonalidad cristalina sin grumos, después se cubre inmediatamente el matraz con papel aluminio para evitar que la solución se degrade con la luz (esta solución debe prepararse unos minutos antes de ser utilizada).

**Acondicionamiento de la muestra:** Se vierten 8.8 mL del analito en un matraz aforado de 10 mL, y se adiciona 0.1 mL de la solución de oxidante (KMnO<sub>4</sub>). La dilución se agita durante 45 segundos para asegurar una mezcla homogénea, después se añaden 0.1 mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> al 98 % y se vuelve a agitar la solución por 45 s. Luego se agrega 0.4 mL del Agente A y se agita por 45 s. Posterior a esto se agregan 0.2 mL de la solución de ácido ascórbico y se vuelve a agitar por 45 s. Finalmente, se agrega agua destilada hasta alcanzar 10 mL. La mezcla final se lleva al horno durante 20 minutos a 40 °C y se deja reposar 5 minutos a temperatura ambiente.

**Determinación de As:** Se mide la absorbancia en el analito previamente acondicionado a 843 nm en el espectrofotómetro UV-VIS (Vázquez-Jaime et al., 2020). La concentración de analito se obtiene de la siguiente mediante la ecuación (1).

$$C_{muestra} = \frac{V_{total} C_{medida}}{V_{muestra}} \quad (1)$$

donde  $C_{muestra}$  es la concentración de As de la muestra con el ajuste debido a la adición de agua destilada,  $C_{medida}$  es la concentración de As medida por el espectrofotómetro UV-Vis, sin considerar la adición de agua.  $V_{total}$  es el volumen total utilizado (10 mL) para medir As y  $V_{muestra}$  es el volumen del analito utilizado (8.8 mL) para ser acondicionado. La Figura 2 esquematiza el proceso de acondicionamiento y determinación de As.

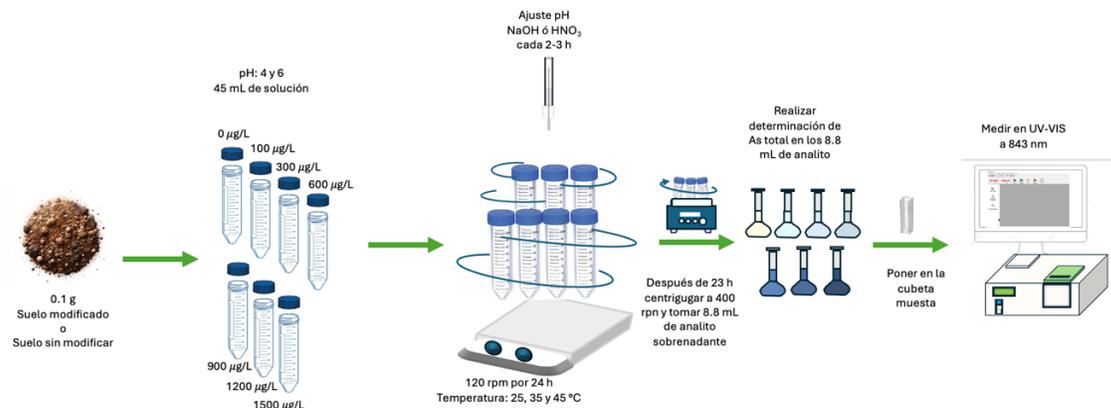


Figura 2. Medición de arsénico con el método azul de molibdeno en UV-Vis.

## Resultados

En la presente sección se presentan los resultados obtenidos en las isotermas de adsorción a 25, 35 y 45 °C a pH de 4 y 6 para los suelos modificados con óxido de hierro, así como para el suelo sin modificar (S.S. M.). La Figura 3 muestra las isotermas a pH de 4 para 25, 35 y 45 °C. En esta Figura podemos observar que la mayor adsorción de As (carga de As,  $\mu\text{g/g}$ ) en un pH de 4 sobre el suelo se presentó a una temperatura de 25 °C, mientras que para las temperaturas de 35 y 45 °C el comportamiento en la capacidad de adsorción fue muy similar. El comportamiento observado en la adsorción de As en suelo puede deberse a que, a temperaturas más bajas, el As es menos soluble por cual la cinética de adsorción puede ser favorecida, aumentando la capacidad de adsorción de As sobre el suelo, mientras que, a temperaturas más altas, la solubilidad del As aumenta, lo que puede influir en la competencia con otros iones, aumentando la desorción de As.

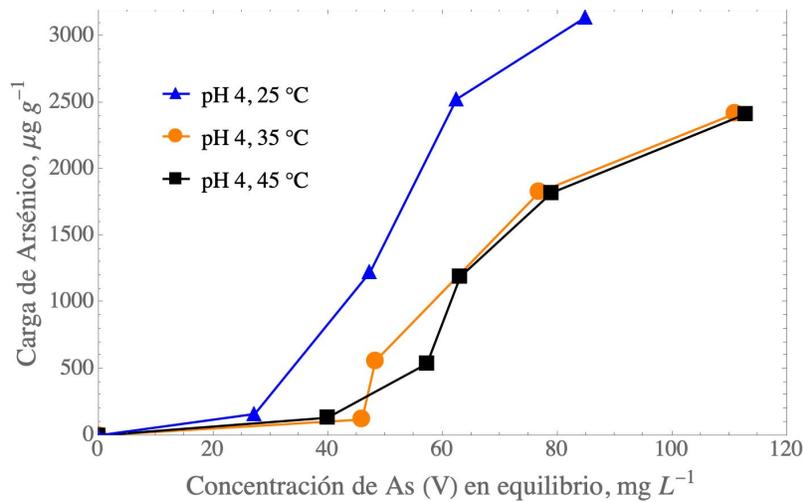


Figura 3. Isotermas de adsorción de As a 25, 35 y 45°C con pH de 4.

Por otro lado, en la Figura 4 podemos observar el comportamiento de las isotermas de adsorción a pH 6. De la misma manera que para pH 4, la mayor capacidad de adsorción de As sobre el suelo a pH 6 tuvo lugar a temperatura de 25 °C, sin embargo a diferencia de las isotermas mostradas a pH 4, a pH 6 podemos observar que conforme aumenta la temperatura disminuye la capacidad de adsorción, cual puede ser debido a lo mencionado anteriormente, es decir, en temperaturas reducidas, la menor solubilidad del arsénico y una cinética de adsorción más efectiva favorecen la adsorción, mientras que en temperaturas elevadas, la mayor solubilidad del arsénico podría intensificar la competencia con otros iones presentes. Adicionalmente, la temperatura modifica las características físicas y químicas del suelo, como su estructura y carga superficial, impactando así su capacidad para adsorber As, por cual sería de suma importancia estudiar la caracterización fisicoquímica y morfológica del suelo.

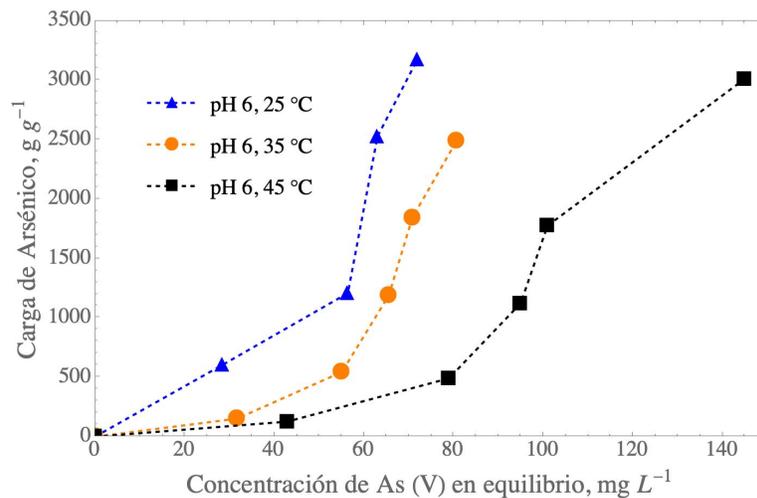


Figura 4. Isotermas de adsorción de As a 25, 35 y 45 °C con pH de 6.

La Figura 5 muestra el comportamiento de las isotermas a pH diferentes. En el inciso a) y b) podemos observar que a 25°C y 35 °C el comportamiento de la capacidad de adsorción es muy similar, sin embargo, a 45 °C podemos observar una mayor capacidad de carga de As sobre el suelo a pH de 4 lo cual puede ser debido a que el pH afecta la forma química y la carga del arsénico, mejorando su adsorción en el suelo. Además, a temperaturas más altas, la reactividad en el suelo se incrementa, posiblemente abriendo más sitios de adsorción debido a cambios en la estructura, lo cual podría facilitar una mayor adsorción.

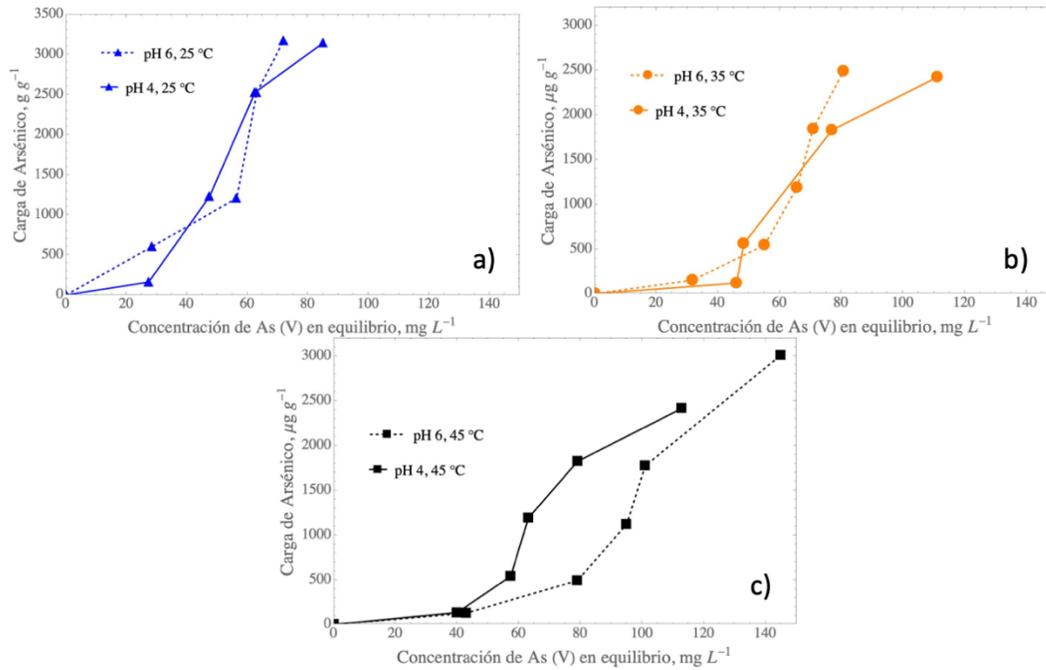


Figura 5. Isothermas de adsorción de As a pH 4 y 6 a) 25°C, b) 35 y c) 45 °C.

Finalmente se realizó una comparación del suelo modificado con óxido de hierro y del suelo sin modificar (S.S.M.) para poder observar si el tratamiento aplicado mejoró la capacidad de adsorción de As sobre suelo utilizado. La Figura 6 muestra que el suelo modificado con óxidos de hierro presentó una mayor carga de As, es decir aumento la capacidad de adsorción de As sobre el suelo, lo cual es debido a que la modificación del suelo con óxidos de hierro mejora la adsorción de As debido a la creación de más sitios de adsorción específicos y efectivos. Por otro lado, las isothermas tanto del suelo modificado con óxidos de hierro como del suelo no modificado realizadas a pH 4 presentaron una mayor adsorción de As que las isothermas realizadas a pH 6, lo cual puede ser debido a que el pH modifica la carga y disponibilidad de los sitios de adsorción, así como la forma y movilidad del As, resultando en una mayor adsorción a pH más bajo.

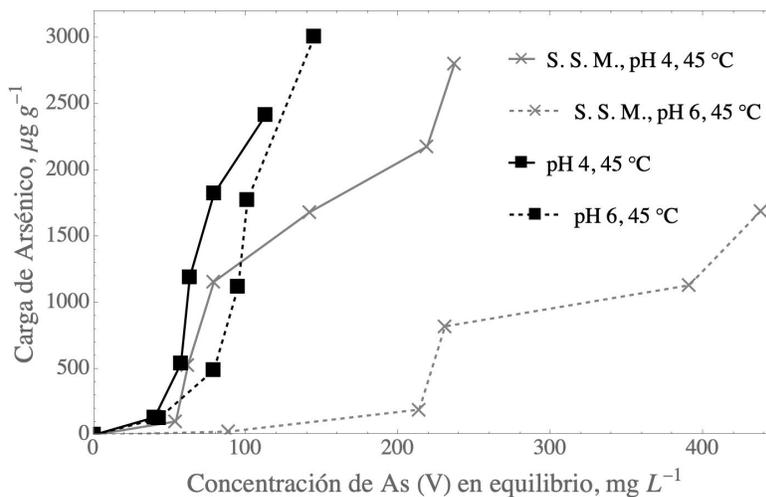


Figura 6. Carga de arsénico en el suelo modificado y sin modificar a pH de 4 y 6 a 45 °C.

## Resultados

Los estudios realizados sobre las isotermas de adsorción de As sobre suelos modificados con óxido de hierro y suelos sin modificar a diferentes temperaturas y pH revelan patrones significativos en la capacidad de adsorción del contaminante. A 25 °C, independientemente del pH, se observa una mayor adsorción de As, probablemente debido a la menor solubilidad del arsénico y una cinética de adsorción más efectiva a temperaturas más bajas, que favorece la adhesión del As a los sitios de adsorción del suelo. A temperaturas más elevadas, la solubilidad del As aumenta, lo que intensifica la competencia con otros iones y puede reducir la adsorción de As. Además, se nota que las modificaciones del suelo con óxidos de hierro mejoran notablemente la capacidad de adsorción de As, evidenciando que estos compuestos incrementan la disponibilidad de sitios específicos y efectivos para la adsorción. Asimismo, el pH influye directamente en la capacidad de adsorción; a pH 4 se logra una mayor adsorción comparado con pH 6, probablemente porque el pH altera la carga del As y modifica la carga y disponibilidad de los sitios de adsorción en el suelo. Estos hallazgos aparte de aportar en el desarrollo de materiales geológicos como adsorbentes subrayan la importancia de la temperatura, pH y modificaciones del suelo en las dinámicas de contaminación y remediación en entornos terrestres.

## Bibliografía/Referencias

- Armienta et al. . (1996). M. A., & Rodríguez, R. (1996). Arsénico en el Valle de Zimapán, México: problemática ambiental. 63, 33-43. Rev. MAPFRE Seguridad, 63, 33-43.
- Bundschuh, A. P. (2008). DISTRIBUCIÓN DEL ARSÉNICO EN LAS REGIONES IBÉRICA E IBEROAMERICANA. Argentina: CYTED.
- Environmental Protection Agency. (2020). EPA.
- EPA. (2022). Groundwater Arsenic Contamination.
- Gomez, R. et al. (2021). Ali, M., & Singh, P. (2021). Community-Based Water Filtration Solutions. . Water Resources Management Journal.
- L. Borgnino et al. . (2009). M.J. Avena, C.P. De Pauli. (2009). Synthesis and characterization of Fe(III)-montmorillonites for phosphate adsorption. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 46–52.
- Londoño-Franco, L. F. et al. (2016). Londoño-Muñoz, P. T., & Muñoz-García, F. G. (2016). Los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal. Biotecnología en el sector agropecuario y agroindustrial, 14(2), 145-153.
- Pillado, A. (18 de Marzo de 2016). Guanajuato consume agua contaminada con arsénico y flúor. Obtenido de <https://www.sdnoticias.com/estados/contaminada-guanajuato-arsenico-consume-agua.html>
- Rodríguez et al. (2003). Adsorción-desorción de arsénico (V) en suelos de cultivo en Castilla y León - Rodríguez; Alvarez-Benedi, Javier; Bolado, Siilvia. págs. 331-338.
- Saldaña-Robles, A. et al. (2017). Saldaña-Robles, N., Saldaña-Robles, A. L., Damian-Ascencio, C., Rangel-Hernández, V. H., & Guerra-Sanchez, R. (2017). Arsenic removal from aqueous solutions and the impact of humic and fulvic acids. Journal of Cleaner Production, 159, 425-431.
- Smith J. et al. (2023). Johnson, L., & Chen, Y. Advances in Arsenic Adsorption Technologies. Journal of Environmental Science and Technology.
- Smith, Lingas, & Rahman. (2000). Contamination of drinking-water by arsenic in Bangladesh: a public health emergency. Bulletin of the World Health Organization, .
- World Health Organization. (7 de Diciembre de 2022). World Health Organization. Obtenido de <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/arsenic>
- World Health Organization. (2023). Fluoride in drinking-water. Obtenido de <https://www.who.int/publications-detail-redirect/9241563192>