

Artículo original

**Tratamiento de agua contaminada con
arsénico utilizando arcilla roja natural como
adsorbente ecológico**

**Treatment of Arsenic-Contaminated Water Using Natural
Red Clay as an Ecological Adsorbent**

ABRAHÁN FERNANDO TREJO ESPINOZA¹

 <https://orcid.org/0000-0002-2314-7350>

PERCY FERMÍN VELÁSQUEZ CCOSI²

 <https://orcid.org/0000-0001-7006-7583>

JUAN CARLOS PONCE RAMÍREZ³

 <https://orcid.org/0000-0002-3723-0550>

Recibido: 19/09/2025

Aceptado: 16/10/2025

Publicado: 20/10/2025

¹Ingeniería Química, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, Ayacucho, Perú

²Ingeniería Agroindustrial, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, Ayacucho, Perú

³Ingeniería en Industrias Alimentarias, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, Ayacucho, Perú

E-mail: ¹abraham.trejo@unsch.edu.pe, ²percy.velasquez@unsch.edu.pe,
³juan.ponce@unsch.edu.pe



Esta obra está bajo licencia internacional
Creative Commons Reconocimiento 4.0



Facultad de Ingeniería
Publicación Oficial

Resumen

El agua destinada al consumo humano enfrenta una creciente contaminación por arsénico, un metaloide tóxico presente de forma natural o derivado de actividades antropogénicas, cuya exposición prolongada representa un riesgo severo para la salud pública. En respuesta a este problema, el estudio tuvo como objetivo evaluar la eficacia de la arcilla roja natural como adsorbente ecológico para la remoción de arsénico en agua. Se aplicó un diseño experimental Plackett-Burman para identificar las variables significativas y la metodología de superficie de respuesta (RSM) para optimizar el proceso. Se analizaron seis factores, entre ellos, el análisis de Pareto identificó como factores determinantes la temperatura de quema, el contenido de Fe_2O_3 y el porcentaje de arcilla roja con $\alpha = 0,05$ y un ajuste de $R^2 = 0,74$. Posteriormente, la optimización mediante RSM permitió alcanzar una remoción máxima de 85,1 % bajo condiciones de 90 % de arcilla roja, 20 % de Fe_2O_3 y 800 °C, con un modelo ajustado de $R^2 = 97,78$ %. En conclusión, la arcilla roja modificada con óxidos férricos constituye una alternativa viable, económica y sostenible para el tratamiento de aguas contaminadas con arsénico, con potencial de aplicación en comunidades rurales donde los métodos convencionales son limitados.

Palabras clave: adsorbente natural; arsénico; metales pesados; remoción de contaminantes.

Abstract

Water intended for human consumption faces increasing contamination by arsenic, a toxic metalloid naturally present or derived from anthropogenic activities, whose prolonged exposure poses a serious public health risk. In response to this problem, the study aimed to evaluate the effectiveness of natural red clay as an ecological adsorbent for arsenic removal from water. A Plackett–Burman experimental design was applied to identify the significant variables, and the Response Surface Methodology (RSM) was used to optimize the process. Six factors were analyzed, among which the Pareto analysis identified firing temperature, Fe_2O_3 content, and red clay percentage as the most influential factors, with a significance level of $\alpha = 0.05$ and a determination coefficient of $R^2 = 0.74$. Subsequently, optimization through RSM achieved a maximum arsenic removal of 85.1% under conditions of 90% red clay, 20 % Fe_2O_3 , and 800 °C, with a fitted model of $R^2 = 97.78$ %. In conclusion, red clay modified with ferric oxides represents a viable, economical, and sustainable alternative for treating arsenic-contaminated water, with strong potential for application in rural communities where conventional methods are limited.

Keywords: natural adsorbent; arsenic; heavy metals; contaminant removal.



1. Introducción

El agua es un recurso esencial para la vida y el desarrollo de las sociedades humanas, pero su calidad y disponibilidad se han visto severamente comprometidas en las últimas décadas debido a la contaminación y la sobreexplotación. Aunque el planeta posee grandes reservas de agua, solo el 2,53 % es dulce y menos del 0,3 % está disponible para el consumo humano a través de fuentes superficiales, como ríos, lagos y acuíferos poco profundos (Sanaye et al., 2023; Al Keyyam et al., 2021). Esta fracción limitada se enfrenta además a una creciente presión derivada del aumento poblacional, la expansión urbana y los efectos del cambio climático, que reducen la disponibilidad hídrica y deterioran su calidad (Medina y Vento, 2022). En consecuencia, millones de personas en el mundo carecen de acceso a agua potable segura, lo que convierte la gestión sostenible de los recursos hídricos en una prioridad (Kuzma et al., 2023; Tashtoush y Alshoubaki, 2024). Una de las amenazas más graves para la calidad del agua es la presencia de contaminantes inorgánicos, entre los cuales el arsénico ocupa un lugar destacado por su toxicidad y persistencia ambiental. Este metaloide se libera al medio acuático tanto por procesos naturales, como la disolución de minerales arsenicales, como por actividades antropogénicas vinculadas a la minería, el uso de pesticidas y la combustión de combustibles fósiles (De Francisco et al., 2021; Wang et al., 2022). La Organización Mundial de la Salud (OMS, 2022) ha establecido un límite máximo de 10 $\mu\text{g/L}$ de arsénico en agua destinada al consumo humano, pero más de 220 millones de personas en el mundo están expuestas a concentraciones superiores a este valor, principalmente en regiones del sudeste asiático y América Latina. La exposición crónica al arsénico se asocia con diversas patologías, entre ellas cáncer de piel, pulmón, hígado y vejiga, así como trastornos cardiovasculares y neurológicos (Hong et al., 2014; Naujokas et al., 2013).

En América Latina, países como Argentina, Chile, México y Perú presentan fuentes naturales de agua con concentraciones de arsénico que superan los límites permisibles debido a procesos hidrogeoquímicos y actividad volcánica (Bundschuh et al., 2021). En el caso del Perú, los registros más elevados se encuentran en la zona sur andina, particularmente en la región Ayacucho, donde la subcuenca del río Apacheta abastece a poblaciones que consumen agua con niveles de arsénico que exceden los valores máximos establecidos por la normativa nacional. Esta situación representa un problema ambiental y sanitario de alta prioridad que demanda soluciones tecnológicas sostenibles, de bajo costo y con disponibilidad local. A lo largo de los años se han desarrollado diversas tecnologías para la remoción de arsénico en el agua, como la coagulación-filtración, el intercambio iónico, la ósmosis inversa y la adsorción (Nicomel et al., 2015). Aunque estos métodos son efectivos, su aplicación en comunidades rurales resulta limitada por los altos costos de operación, la complejidad técnica y la necesidad de infraestructura especializada. En respuesta a estas limitaciones, se han impulsado estrategias basadas en el uso de materiales naturales con propiedades adsorbentes, los cuales representan una alternativa ecológica, económica y de fácil implementación (Rahidul Hassan, 2023).

Entre los materiales naturales disponibles, las arcillas han despertado un interés por su abundancia, bajo costo y notable capacidad para retener contaminantes metálicos. En particular, la arcilla roja destaca por su estructura laminar, elevada área superficial y contenido de óxidos de hierro y aluminio, características que favorecen la adsorción de iones metálicos y metaloides como el arsénico (Ewis et al., 2022). Se han demostrado que el tratamiento térmico

o químico de la arcilla roja incrementa su capacidad de remoción, alcanzando eficiencias superiores al 80 % (Wang et al., 2022). Además, su disponibilidad en regiones andinas como Ayacucho facilita su aprovechamiento como material local sostenible. En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar la eficacia de la arcilla roja natural como material adsorbente ecológico para el tratamiento de agua contaminada con arsénico.

2. Metodología

2.1. Área de estudio, materiales y reactivos

La investigación se desarrolló en el Laboratorio de Química de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, ubicado en la ciudad de Ayacucho, Perú. La arcilla roja se recolectó en la localidad de Patasucro, provincia de Huanta, mientras que la diatomita y los demás materiales se obtuvieron de la zona de Condoray 1, distrito de Huamanguilla, ambas pertenecientes al departamento de Ayacucho. Los reactivos empleados fueron de grado analítico, entre ellos óxido de hierro (Fe_2O_3), óxido de aluminio (Al_2O_3) y sales estabilizantes para la formulación del soporte, además del arsenito de sodio heptahidratado ($\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) utilizado en la preparación de la solución contaminada con arsénico. Además, se emplearon reactivos del método colorimétrico del complejo azul de molibdeno, necesarios para la cuantificación espectrofotométrica del arsénico. El agua destilada se empleó en todas las etapas de preparación y en los enjuagues de materiales.

2.2. Preparación del material naturales

En primer lugar, las muestras de arcilla roja y diatomita fueron lavadas con abundante agua destilada para eliminar impurezas orgánicas y partículas finas no deseadas. Posteriormente, se dejaron secar a temperatura ambiente hasta alcanzar humedad constante. Una vez secas, las muestras se trituraron mecánicamente hasta obtener un polvo homogéneo. Luego se procedió al tamizado empleando una malla de 70 ASTM ($210\ \mu\text{m}$), con el propósito de asegurar una granulometría uniforme y adecuada para los ensayos de adsorción. Las fracciones tamizadas se homogenizaron cuidadosamente y se almacenaron en recipientes herméticos para evitar la absorción de humedad ambiental. A partir de los materiales preparados, se elaboraron pastas cerámicas mediante la adición controlada de agua destilada hasta obtener una mezcla moldeable. Estas pastas fueron maceradas durante 48 h para favorecer la uniformidad de la masa y la activación de los sitios de intercambio superficial. Posteriormente, se moldearon pellets cilíndricos de tamaño regular y se sometieron a un proceso de sinterización a diferentes temperaturas, según las condiciones establecidas en el diseño experimental. Este tratamiento térmico permitió mejorar la estabilidad estructural y la resistencia mecánica del soporte adsorbente.

2.3. Diseño experimental y optimización

Para evaluar la influencia de las principales variables en el proceso de remoción de arsénico, se aplicó un diseño experimental de tipo Plackett-Burman, que permite identificar los factores más significativos con un número reducido de ensayos. Se consideraron seis variables independientes: porcentaje de arcilla roja (50–90 %), porcentaje de óxido de hierro (Fe_2O_3) (10–20 %), porcentaje de óxido de aluminio (Al_2O_3) (10–20 %), concentración de estabilizante



(5–10 %), temperatura de quema (600–800 °C) y tiempo de retención (12–48 horas). Se realizaron 12 formulaciones experimentales, considerando como variable de respuesta el porcentaje de remoción de arsénico del agua. Cada tratamiento se diseñó con el fin de observar el comportamiento individual y combinado de los factores sobre la eficiencia del proceso, permitiendo posteriormente seleccionar las condiciones con mayor efecto positivo en la adsorción del contaminante. La Tabla 1 resume las combinaciones de factores y niveles evaluados en el estudio.

Tabla 1
Formulaciones de las muestras experimentales

Formulaciones	Componentes				T° de quema (°C)	Θ retención (h)
	Arcilla roja (%)	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Estabilizantes (%)		
1	90	10	20	5	600	12
2	90	20	10	10	600	12
3	50	20	20	5	800	12
4	90	10	20	10	600	48
5	90	20	10	10	800	12
6	90	20	20	5	800	48
7	50	20	20	10	600	48
8	50	10	20	10	800	12
9	50	10	10	10	800	48
10	90	10	10	5	800	48
11	50	20	10	5	600	48
12	50	10	10	5	600	12

A partir de las variables significativas identificadas en la primera fase, se desarrolló una segunda etapa experimental basada en la metodología de superficie de respuesta (RSM) para optimizar las condiciones de operación. Se plantearon 11 formulaciones (F1–F11) con diferentes combinaciones de los factores seleccionados (temperatura de quema, % arcilla roja, % Fe₂O₃), a fin de maximizar la remoción de arsénico (Tabla 2). El análisis estadístico permitió ajustar un modelo polinómico cuadrático con un coeficiente de determinación (R²).

Tabla 2
Formulaciones del diseño de optimización del proceso

Formulaciones	%		T° de quema (°C)
	Arcilla roja (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	
1	50	20	800
2	50	10	600
3	70	15	700
4	90	20	600
5	90	10	600
6	90	20	800
7	50	20	600
8	70	15	700
9	50	10	800
10	90	10	800
11	70	15	700

2.4. Ensayos de adsorción

Las pruebas de adsorción se efectuaron utilizando soluciones patrón de arsénico con una concentración inicial de 1,000 ppm, preparadas a partir de arsenito de sodio ($\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) en agua destilada. Los ensayos se realizaron en columnas de adsorción de vidrio de 5 cm de diámetro interno y 1,5 m de longitud, equipadas con una válvula inferior que permitió controlar el flujo de salida de la solución. En cada columna se colocaron 500 g del soporte adsorbente previamente preparado y se procesó un volumen de 1 L de solución contaminada. El flujo se mantuvo constante durante el tiempo de contacto, garantizando la interacción efectiva entre el adsorbato (arsénico) y el adsorbente (arcilla roja). Una vez finalizado el proceso, las muestras tratadas se recolectaron para su análisis posterior.

2.5. Determinación de la concentración de arsénico

La concentración residual de arsénico en las soluciones tratadas se determinó mediante espectrofotometría visible, aplicando el método colorimétrico del complejo azul de molibdeno. Este procedimiento se basa en la reacción del arseniato con molibdato de amonio en medio ácido para formar un complejo coloreado que se reduce posteriormente con un agente reductor, generando un tono azul cuya intensidad es proporcional a la concentración de arsénico. Las mediciones se realizaron con un espectrofotómetro Jenway modelo 6305, estableciendo una curva de calibración con estándares en el rango de 0,00 a 1,50 ppm. Las lecturas se efectuaron a una longitud de onda de 880 nm, de acuerdo con los procedimientos propuestos por Dhar et al. (2004) y Tsang et al. (2007). Cada muestra fue analizada por triplicado para garantizar la precisión de los resultados. La ecuación de la curva de calibración fue $y = 0,6065x + 0,0666$, donde “y” corresponde a la absorbancia y “x” a la ppm de As.

2.6. Análisis estadístico

Se aplicó análisis de varianza (ANOVA) para evaluar la significancia de los factores en el modelo. Se utilizó el principio de Pareto para determinar el efecto individual y combinado de las variables sobre la eficiencia de remoción del arsénico. Asimismo, se calculó el coeficiente de determinación (R^2) con el fin de evaluar el grado de ajuste del modelo estadístico al conjunto de datos experimentales. Se consideró un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$ para la interpretación de los resultados, valor que permitió identificar las variables con influencia estadísticamente significativa sobre el proceso.

3. Resultados

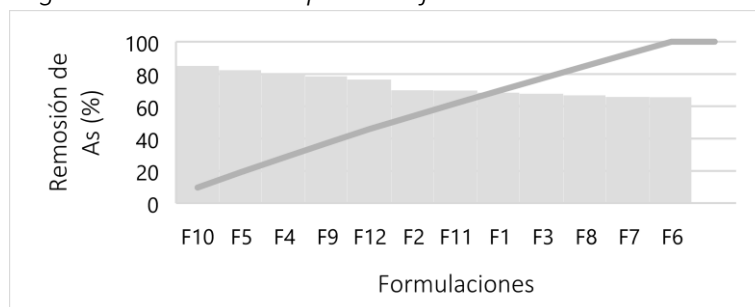
En la primera fase experimental se aplicó el diseño Plackett–Burman (DSD) con doce formulaciones (F1–F12) para identificar las variables que influyen en la remoción de arsénico. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 1, donde se observa que los porcentajes de remoción oscilaron entre 65,7 % y 85,1 %, evidenciando una variación significativa en la eficacia de los diseños según la composición y las condiciones térmicas aplicadas. Las formulaciones F5 (82,4 %), F10 (85,1 %), F4 (80,2 %) y F9 (78,6 %) mostraron los valores más elevados de remoción, lo cual indica que las proporciones altas de Fe_2O_3 , junto con temperaturas de quema de 800 °C, favorecen la activación del material adsorbente. De acuerdo con estos resultados, la formulación F10, correspondiente a 90 % de arcilla roja, 10 % de Fe_2O_3 , 10 % de Al_2O_3 , 5 % de



estabilizante, 800 °C y 48 h, alcanzó la mayor remoción (85,1 %) de arsénico en la fase de cribado. Este comportamiento sugiere que la interacción entre los componentes férricos y la matriz de arcilla roja juega un papel determinante en la retención del arsénico.

Figura 1

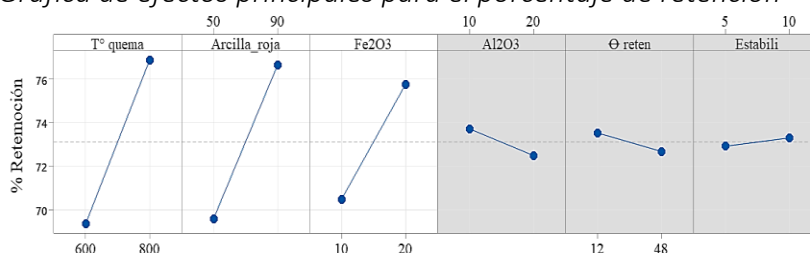
Diagrama de Pareto del porcentaje de remoción de As



El análisis estadístico del diseño tipo Plackett–Burman indicó que las variables con mayor influencia sobre la remoción fueron la temperatura de quema, el porcentaje de arcilla roja y el porcentaje de Fe_2O_3 , con una varianza explicada del 74,18 % ($R^2 = 0,7418$). Por el contrario, el Al_2O_3 , los estabilizantes y el tiempo de retención mostraron efectos no significativos ($p > 0,05$), así como se muestra en la Figura 2. Además, la temperatura de calcinación demostró ser el factor más relevante, ya que determina la estructura porosa, la estabilidad cristalina y la densidad de grupos funcionales de la superficie. En general, se aprecia que el aumento de la temperatura y del contenido de Fe_2O_3 incrementan la eficacia del proceso, mientras que proporciones elevadas de Al_2O_3 tienden a reducirla.

Figura 2

Grafica de efectos principales para el porcentaje de retención



A partir de los factores más influyentes, se realizó un diseño de optimización utilizando la metodología de superficie de respuesta (RSM). Los resultados se presentan en la Figura 3, donde se observa que los porcentajes de remoción oscilaron entre 70,2 % y 83,2 %, con los valores más altos obtenidos en las formulaciones 6 (83,2), 7 (82,6) y 10 (82,3).

Figura 3

Tendencia de optimización del proceso de remoción de arsénico

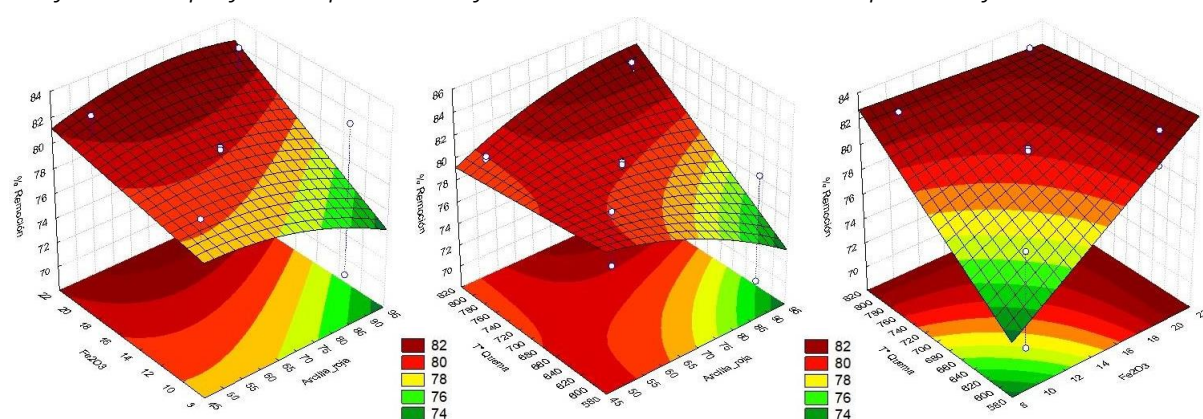


El análisis de varianza (ANOVA) reveló que las variables temperatura de quema ($p = 0,006$) y porcentaje de Fe_2O_3 ($p = 0,008$), así como las interacciones T° quema $\times$ arcilla roja ($p = 0,005$) y T° quema $\times$ Fe_2O_3 ($p = 0,008$), fueron estadísticamente significativas ($\alpha = 0,05$), mientras que la variable individual temperatura de quema obtuvo un valor p de 0,06, indicando una influencia positiva en la remoción de arsénico. El modelo ajustado alcanzó un coeficiente de determinación de $R^2 = 97,78 \%$, evidenciando un ajuste adecuado entre los valores experimentales y los predichos por el modelo. El modelo predijo un porcentaje máximo de remoción de 83,84 %, logrado con una combinación de 90 % de arcilla roja, 20 % de Fe_2O_3 y temperatura de calcinación de 800 °C. El análisis de superficie de respuesta permitió determinar las condiciones óptimas para maximizar la eficiencia de remoción de arsénico.

La Figura 4 muestra la superficie de respuesta tridimensional del modelo, donde se observa que el incremento de la temperatura de quema y del contenido de Fe_2O_3 favorece la capacidad de adsorción del material, alcanzando el máximo en las condiciones optimizadas indicadas.

Figura 4

Gráficos de superficie respuesta de efectos estandarizados sobre el porcentaje de remoción



4. Discusión

La eficiencia alcanzada en este estudio concuerda con lo reportado por Rivera y Piña (2005), quienes demostraron la alta capacidad de remoción de arsénico de minerales naturales acondicionados con óxidos metálicos. Asimismo, Castro de Esparza (2006) y Justiniano (2017) señalaron que la temperatura de cocción del soporte influye en la formación de sitios activos superficiales que favorecen la adsorción de especies arsenicales. En este caso, la calcinación a 800 °C resultó determinante para maximizar la remoción, probablemente por el aumento de la porosidad, la estabilidad estructural y la exposición de grupos funcionales activos. Este comportamiento coincide con lo descrito por El-Rayyes et al. (2025) y Wang et al. (2024), quienes destacan que un tratamiento térmico controlado en el rango de 600–800 °C optimiza la estructura adsorbente y evita la sinterización excesiva. Los resultados del cribado y la optimización confirman que la arcilla roja modificada con óxidos de hierro constituye una alternativa eficiente para la remoción de arsénico en agua. La identificación de la temperatura de calcinación, el contenido de Fe_2O_3 y la proporción de arcilla roja como variables críticas coincide con estudios que asocian la activación térmica y la impregnación férrica con un aumento de los sitios activos de adsorción y de la afinidad por especies arsenicales (Reyes-Bozo



et al., 2025; Mojiri et al., 2024). La adición de 20 % de Fe_2O_3 incrementó significativamente la eficiencia, atribuible a la formación de enlaces Fe–O–As estables en la superficie, en concordancia con Aredes et al. (2012) y Foroutan et al. (2019). Esta tendencia ha sido reportada también en materiales férricos naturales y sintéticos con alta selectividad hacia arseniato y arsenito (Liao et al., 2024; (Devrajani et al., 2024)).

La combinación óptima de 90 % de arcilla roja y 20 % de Fe_2O_3 , calcinada a 800 °C, alcanzó una eficiencia de remoción de 83,84 %, lo que evidencia que este material constituye un adsorbente ecológico, de bajo costo y alta efectividad. El alto ajuste del modelo ($R^2 = 97,78$ %) y la significancia de las interacciones entre factores respaldan el uso de metodologías de superficie de respuesta (RSM) para la optimización de procesos de adsorción, tal como recomiendan Khoddam et al. (2024) y Montgomery (2017). Desde el punto de vista mecanístico, la adsorción de arsénico sobre arcilla roja modificada puede atribuirse a procesos combinados de intercambio iónico en capas laminares, formación de puentes Fe–O–As y atrapamiento físico en poros generados por la sinterización. La coexistencia de sílice, aluminio y óxidos férricos en la matriz mineral favorece múltiples rutas de retención para As (III) y As (V), aportando estabilidad frente a variaciones de pH y composición (Wang et al., 2024). Esta sinergia entre la matriz arcillosa y las fases activas de hierro se consolida como una estrategia eficaz y sostenible para el tratamiento de aguas contaminadas (Reyes-Bozo et al., 2025; Liao et al., 2024).

Las eficiencias superiores al 80 % obtenidas se encuentran dentro del rango reportado para adsorbentes naturales modificados térmica y químicamente. Sin embargo, la capacidad de adsorción puede verse afectada por la concentración inicial de arsénico, el tipo de especie presente, el pH y la presencia de aniones competitivos (Devrajani et al., 2024; Mojiri et al., 2024). Por tanto, futuras investigaciones deberían evaluar la influencia de estos factores en condiciones reales, así como la regeneración y estabilidad del material. Considerando los resultados obtenidos, la aplicación de arcilla roja local modificado con óxidos férricos representa una alternativa viable para el tratamiento de aguas en zonas rurales o semiáridas, gracias a su abundancia, bajo costo y facilidad de producción. No obstante, para garantizar su sostenibilidad a gran escala se recomienda investigar su regeneración, el manejo del arsénico retenido y su desempeño frente a aguas naturales con matrices complejas. La literatura reciente enfatiza la necesidad de validar estos sistemas a nivel piloto e integrar análisis de ciclo de vida (LCA) para evaluar su impacto ambiental y económico (Foroutan et al., 2019; Reyes-Bozo et al., 2025).

5. Conclusiones

La arcilla roja natural, combinada con óxidos de hierro, posee una elevada capacidad para reducir las concentraciones de arsénico en agua, alcanzando eficiencias superiores al 80 % bajo condiciones controladas. El modelo estadístico mostró un alto grado de ajuste, lo que respalda la validez del diseño experimental y la pertinencia del enfoque de superficie de respuesta aplicado. La composición y el tratamiento térmico del material demostraron ser determinantes en la activación de los sitios superficiales responsables del proceso de adsorción.

Se evidencian el potencial del material desarrollado como una alternativa accesible y ambientalmente compatible para el tratamiento de aguas con contaminación arsenical. Su disponibilidad local, bajo costo y estabilidad estructural lo posicionan como una opción

prometedora para su aplicación en entornos rurales o con infraestructura limitada. Se recomienda continuar evaluando su comportamiento en condiciones reales,

Contribución de los autores

A. F. Trejo: Conceptualización, curación de datos, adquisición de fondos, administración del proyecto, recursos, redacción-revisión y edición. **P. F. Velásquez:** Investigación, software, validación y visualización. **J. C. Ponce:** Análisis formal, metodología, supervisión y redacción del borrador original.

Conflictos de interés

Los autores informan que no poseen conflictos de interés que puedan influir en esta publicación.

6. Referencias Bibliográficas

- Al Keyyam, I., Al-Nimr, M., Khashan, S., y Keewan, A. (2021). A new solar atmospheric water harvesting integrated system using CPV/T – Stirling engine – Absorption cooling cycle and vapor compression refrigeration cycle. *International Journal of Energy Research*, 45(11), 16400–16417. <https://doi.org/10.1002/er.6888>
- Aredes, S., Klein, B. y Pawlik, M. (2012) The Removal of Arsenic from Water Using Natural Iron Oxide Minerals. *Journal of Cleaner Production*, 29-30, 208-213. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.01.029>
- Bundschuh, J., Armienta, M. A., Morales-Simfors, N., Alam, M. A., López, D. L., Delgado Quezada, V., Dietrich, S., Schneider, J., Tapia, J., Sracek, O., Castillo, E., Marco Parra, L.-M., Altamirano Espinoza, M., Guimarães Guilherme, L. R., Sosa, N. N., Niazi, N. K., Tomaszewska, B., Lizama Allende, K., Bieger, K., ... Ahmad, A. (2021). Arsenic in Latin America: New findings on source, mobilization and mobility in human environments in 20 countries based on decadal research 2010-2020. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 51(16), 1727–1865. <https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1770527>
- Castro de Esparza M. L. (2006, 20 al 24 de junio) Remoción del arsénico en el agua para bebida y biorremediación de suelos [conferencia]. *International Congress: Natural Arsenic in Groundwaters of Latin America*, Ciudad de México, México. <https://es.scribd.com/doc/20827285/Remocion-del-arsenico>
- De Francisco, P., Martín-González, A., Rodríguez-Martín, D., y Díaz, S. (2021). Interactions with arsenic: Mechanisms of toxicity and cellular resistance in eukaryotic microorganisms. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(22), 12226. <https://doi.org/10.3390/ijerph182212226>
- Devrajani, S. K., Ahmed, Z., Qambrani, N. A., Kanwal, S., Sundaram, U. M., y Mubarak, N. M. (2024). Mechanism of arsenic removal using brown seaweed derived impregnated with iron oxide biochar for batch and column studies. *Scientific Reports*, 14(1), 18102. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-69117-9>



- Dhar, R. K., Zheng, Y., Rubenstone, J., y van Geen, A. (2004). A rapid colorimetric method for measuring arsenic concentrations in groundwater. *Analytica Chimica Acta*, 526(2), 203–209. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2004.09.045>
- El-Rayyes, A., Hefnawy, M., Refat, M. S., Ogunbamowo, O. E., Babatimehin, A. M., Ngueagni, P. T., Ofudje, E. A., y Alsuhaibani, A. M. (2025). Kinetics, equilibrium and thermodynamics studies on natural and heat treated clays for the removal of arsenate ions from aqueous solution. *Scientific Reports*, 15(1), 15526. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-00361-3>
- Ewis, D., Ba-Abbad, M. M., Benamor, A., y El-Naas, M. H. (2022). Adsorption of organic water pollutants by clays and clay minerals composites: A comprehensive review. *Applied Clay Science*, 229(106686), 106686. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2022.106686>
- Foroutan, R., Mohammadi, R., Adeleye, A. S., Farjadfar, S., Esvandi, Z., Arfaeinia, H., Sorial, G. A., Ramavandi, B., y Sahebi, S. (2019). Efficient arsenic(V) removal from contaminated water using natural clay and clay composite adsorbents. *Environmental Science and Pollution Research International*, 26(29), 29748–29762. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06070-5>
- Hong, Y.-S., Song, K.-H., y Chung, J.-Y. (2014). Health effects of chronic arsenic exposure. *Yebang Uihakhoe Chi [Journal of Preventive Medicine and Public Health]*, 47(5), 245–252. <https://doi.org/10.3961/jpmph.14.035>
- Justiniano, E. Y. (2017). *Técnicas de cocción de cerámica, tablas de temperatura y pirómetros* [Monografía de Suficiencia Profesional, Universidad Nacional de Educación Enrique Guzmán y Valle]. <https://repositorio.une.edu.pe/entities/publication/c88608cc-d763-45ff-95bf-cda6d4e9f65f>
- Khoddam, M. A., Norouzbeigi, R., Velayi, E., y Cavallaro, G. (2024). Statistical-based optimization and mechanism assessments of Arsenic (III) adsorption by ZnO-Halloysite nanocomposite. *Scientific Reports*, 14(1), 21629. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-72885-z>
- Kuzma, S., Bierkens, M. F. P., Lakshman, S., Luo, T., Saccoccia, L., Sutanudjaja, E. H., y Van Beek, R. (2023). Aqueduct 4.0: Updated decision-relevant global water risk indicators. *World Resources Institute*. <https://doi.org/10.46830/writn.23.00061>
- Liao, X., Miranda Avilés, R., Serafin Muñoz, A. H., Rocha Amador, D. O., Perez Rodriguez, R. Y., Hernández Anguiano, J. H., Julia Navarro, C., Zha, X., Moncada, D., de Jesús Puy Alquiza, M., Vinod Kshirsagar, P., y Li, Y. (2024). Efficient arsenic removal from water using iron-impregnated low-temperature biochar derived from henequen fibers: performance, mechanism, and LCA analysis. *Scientific Reports*, 14(1), 20769. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-69769-7>
- Mojiri, A., Razmi, E., KarimiDermani, B., Rezania, S., Kasmuri, N., Vakili, M., y Farraji, H. (2024). Adsorption methods for arsenic removal in water bodies: a critical evaluation of effectiveness and limitations. *Frontiers in water*, 6. <https://doi.org/10.3389/frwa.2024.1301648>
- Montgomery, D. C. (2017). *Design and analysis of experiments* (9.^a ed.). John Wiley & Sons.
- Naujokas, M. F., Anderson, B., Ahsan, H., Aposhian, H. V., Graziano, J. H., Thompson, C., y Suk, W. A. (2013). The broad scope of health effects from chronic arsenic exposure: update

- on a worldwide public health problem. *Environmental Health Perspectives*, 121(3), 295–302. <https://doi.org/10.1289/ehp.1205875>
- Nicomel, N. R., Leus, K., Folens, K., Van Der Voort, P., y Du Laing, G. (2015). Technologies for arsenic removal from water: Current status and future perspectives. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 13(1), ijerph13010062. <https://doi.org/10.3390/ijerph13010062>
- Organización Mundial de la Salud [OMS]. (2022, 7 de diciembre). *Arsenic*. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/arsenic>
- Rahidul Hassan, H. (2023). A review on different arsenic removal techniques used for decontamination of drinking water. *Environmental Pollutants and Bioavailability*, 35(1). <https://doi.org/10.1080/26395940.2023.2165964>
- Reyes-Bozo, L., Vyhmeister, E., Castane, G. G., Chirinos, J., Zárraga, J., Sandoval-Yáñez, C., y Valdés-González, H. (2025). A systematic literature review on the use of clays for arsenic removal. *Water*, 17(9), 1402. <https://doi.org/10.3390/w17091402>
- Rivera, M. D. L., y Piña, M. (2005) *Tratamiento de agua para remoción de arsénico mediante adsorción sobre zeolita natural acondicionada*.
- Sanaye, S., Shourabi, A., y Borzuei, D. (2023). Sustainable water production with an innovative thermoelectric-based atmospheric water harvesting system. *Energy Reports*, 10, 1339–1355. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.07.062>
- Tashtoush, B., y Alshoubaki, A. Y. (2024). Solar-off-grid atmospheric water harvesting system: Performance analysis and evaluation in diverse climate conditions. *The Science of the Total Environment*, 906(167804), 167804. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167804>
- Tsang, S., Phu, F., Baum, M. M., y Poskrebyshev, G. A. (2007). Determination of phosphate/arsenate by a modified molybdenum blue method and reduction of arsenate by $S_2O_4^{2-}$. *Talanta*, 71(4), 1560–1568. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2006.07.043>
- Wang, N., Ye, Z., Huang, L., Zhang, C., Guo, Y., y Zhang, W. (2022). Arsenic occurrence and cycling in the aquatic environment: A comparison between freshwater and seawater. *Water*, 15(1), 147. <https://doi.org/10.3390/w15010147>
- Wang, P., Shen, X., Qiu, S., Zhang, L., Ma, Y., y Liang, J. (2024). Clay-based materials for heavy metals adsorption: Mechanisms, advancements, and future prospects in environmental remediation. *Crystals*, 14(12), 1046. <https://doi.org/10.3390/cryst14121046>