

Arcilla ferrosa como coagulante para la reducción de arsénico en agua subterránea

Ferrous clay as a coagulant for arsenic reduction in groundwater

Mario Roberto García Sandoval¹

¹Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Dirección para recibir correspondencia: mrgs_98@hotmail.com

Recibido: 26/07/2025

Revisión: 01/09/2025

Aceptado: 23/10/2025

Resumen

El arsénico está presente en algunos pozos mecánicos de Guatemala, representando un riesgo para la salud cuando el agua se consume con concentraciones que superan la norma COGUANOR NTG 29001. Este estudio evaluó la eficiencia de la arcilla ferrosa como coagulante natural para reducir el arsénico presente en agua subterránea. Se aplicaron dosis de arcilla ferrosa expresadas como concentración (25 a 100 g/L) combinadas con tiempos de sedimentación de 30 y 60 minutos; posteriormente, el sobrenadante se filtró mediante un elemento cerámico de porosidad controlada. Se analizaron parámetros iniciales y finales de pH, conductividad eléctrica, turbidez, color, arsénico y hierro total. Los resultados mostraron reducciones de arsénico entre 47.37% y 80.70%, alcanzando un valor mínimo de 0.011 mg/L, aunque sin cumplir con el límite normativo. Los demás parámetros permanecieron dentro de rangos aceptables y no se observó incremento en el hierro total en los tratamientos evaluados. Los hallazgos sugieren que la arcilla ferrosa puede contribuir a una disminución parcial del arsénico en condiciones de laboratorio, con potencial como etapa preliminar de tratamiento. Como limitaciones principales se identificaron la ausencia de caracterización mineralógica/textural del material, el número reducido de réplicas (n=2) y la no optimización de variables operativas (pH y mezcla); adicionalmente, la disponibilidad de muestras con arsénico estuvo condicionada por restricciones de acceso a pozos afectados.

Palabras claves: Arsénico, arcilla ferrosa, coagulación, adsorción, agua subterránea, tratamiento de agua potable.

Abstract

Arsenic is present in some mechanical wells in Guatemala, posing a health risk when water is consumed at concentrations exceeding the COGUANOR NTG 29001 standard. This study evaluated the efficiency of ferrous clay as a natural coagulant for reducing arsenic in groundwater. Ferrous clay was applied at doses expressed as concentration (25 to 100 g/L) combined with sedimentation times of 30 and 60 minutes, followed by filtration of the supernatant through a controlled-porosity ceramic element. Initial and final values of pH, electrical conductivity, turbidity, color, arsenic, and total iron were analyzed. Arsenic reductions ranged from 47.37% to 80.70%, reaching a minimum concentration of 0.011 mg/L, although the regulatory limit was not achieved. All other parameters remained within acceptable ranges, and no increase in total iron was observed in the evaluated treatments. The findings suggest that ferrous clay can contribute to partial arsenic reduction under laboratory conditions and could be considered as a preliminary treatment stage. Main limitations included the lack of mineralogical/textural characterization of the material, the limited number of replicates (n=2), and the lack of operational optimization (pH and mixing); additionally, the availability of arsenic-contaminated samples was constrained by limited access to affected wells.

Key words: Arsenic, ferrous clay, coagulation, adsorption, groundwater, drinking water treatment.



Introducción

La disponibilidad de agua apta para consumo humano continúa siendo un desafío en Guatemala, especialmente en zonas donde la población depende de pozos mecánicos como principal fuente de abastecimiento. Diversos estudios han evidenciado que, en algunos sectores del país, el agua subterránea presenta concentraciones elevadas de arsénico, un metaloide tóxico que puede provocar efectos adversos en la salud humana cuando se ingiere de forma prolongada (Mayorga Moreno, 2013). La exposición crónica al arsénico se ha asociado con cáncer, lesiones cutáneas, enfermedades cardiovasculares y neuropatías, lo que convierte su presencia en el agua potable en un problema de salud pública prioritario (Agency for Toxic Substances and Disease Registry [ATSDR], 2007).

La remoción de arsénico en agua ha sido estudiada mediante diferentes tecnologías, entre ellas la coagulación con compuestos de hierro, la adsorción y el uso de medios filtrantes basados en óxidos férricos. Estudios recientes confirman el papel central de los coagulantes férricos y la influencia de variables operativas como pH, dosis y matriz iónica sobre la remoción (Inam et al., 2021). Asimismo, se han reportado esquemas integrados de ingeniería sanitaria que combinan coagulación o filtración rápida como pretratamiento y, posteriormente, adsorción para alcanzar concentraciones finales cercanas o inferiores a 0.01 mg/L en aguas subterráneas altamente contaminadas (Chiavola et al., 2019).

Smith Meléndez (2007) demostró que el empleo de óxido de hierro confinado en capas de arena y piedrín permitió reducir el arsénico entre un 92.46% y un 99.89%. De manera similar, en Perú, Veli Jiménez y Álvarez Camarena (2014) evaluaron la adsorción de arsénico utilizando arcilla natural, reportando remociones de hasta un 97.5% debido a su porosidad y a un mecanismo de adsorción física. Estas investigaciones evidencian que los materiales ricos en hierro poseen un notable potencial como coagulantes o adsorbentes económicos y accesibles.

En Guatemala, sin embargo, los estudios relacionados con el uso de arcilla ferrosa como coagulante son limitados, pese a la disponibilidad de este material en diversas regiones del país. Esta situación abre la oportunidad de evaluar alternativas locales que permitan disminuir el arsénico mediante

procesos de bajo costo y fácilmente aplicables en comunidades rurales o en sistemas pequeños de abastecimiento.

En el ámbito regional, se han documentado alternativas para el abastecimiento y tratamiento de agua en comunidades rurales, así como consideraciones para el manejo sostenible del recurso hídrico y el control de contaminantes en aguas subterráneas (Argueta López, 2009; Pooi & Ng, 2018; Romero Rojas, 1999; Sepúlveda Saa, 2009).

En este contexto, la presente investigación pretende generar evidencia experimental sobre el comportamiento de la arcilla ferrosa como coagulante en la remoción de arsénico en agua subterránea proveniente de un pozo mecánico, evaluando diferentes concentraciones y tiempos de sedimentación según la Norma COGUANOR NTG 29001.

Antecedentes

Smith Meléndez (2007) desarrolló un estudio a escala de laboratorio para remover arsénico en agua mediante un medio filtrante de óxido de hierro, con el propósito de cumplir con los estándares de agua potable vigentes en países centroamericanos. El autor reportó eficiencias de remoción entre 92.46% y 99.89% al emplear óxido de hierro como medio filtrante.

Veli Jiménez y Álvarez Camarena (2014) evaluaron la remoción de arsénico en agua de manantial mediante adsorción con arcilla natural, analizando el efecto del pH y del tiempo de contacto. Los autores atribuyeron la disminución del metaloide a la porosidad del material y a un mecanismo de adsorción predominantemente física, asociado con interacciones de Van der Waals y fuerzas electrostáticas entre la arcilla (adsorbente) y el arsénico (adsorbato).

En dicho estudio, el mecanismo de adsorción se describió principalmente como una adsorción específica en monocapa, alcanzándose una remoción de arsénico de hasta 97.5%. En consecuencia, se concluyó que la adsorción con arcilla natural constituye una alternativa emergente para disminuir este metaloide, en particular por la disponibilidad del material y su costo relativamente accesible.

Asimismo, Mayorga Moreno (2013) señala que el arsénico presente en aguas subterráneas puede transferirse al suelo y a las plantas, lo cual incrementa

la exposición y el riesgo para la población. Por su parte, la Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR, 2007) advierte que la exposición prolongada, incluso a bajas concentraciones, puede ocasionar efectos adversos como lesiones cutáneas, cáncer y alteraciones cardiovasculares. En conjunto, estos antecedentes evidencian la relevancia sanitaria del problema y sustentan la necesidad de evaluar tecnologías de remoción que sean accesibles y eficientes.

Materiales y método

La investigación se desarrolló con enfoque cuantitativo y diseño experimental. Se evaluó el efecto de la dosis de arcilla ferrosa, expresada como concentración masa/volumen (g/L), y del tiempo de sedimentación sobre la remoción de arsénico en agua de un pozo mecánico. Debido al carácter exploratorio del estudio y a que los análisis de laboratorio fueron efectuados por un tercero, los resultados se interpretaron mediante estadística descriptiva, sin aplicar pruebas inferenciales.

Variables

Variable independiente 1: concentración de arcilla ferrosa (dosis expresada en g/L: 25, 50, 75 y 100 g/L).

Variable independiente 2: tiempo de sedimentación (30 y 60 min).

Variables dependientes:

- Concentración de arsénico (mg/L).
- Concentración de hierro total (mg/L).
- Turbidez (NTU).
- Color aparente (Pt-Co).
- Color real (Pt-Co).
- Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$).
- Potencial de hidrógeno (pH).

Muestra y muestreo

La muestra de agua provino de un pozo mecánico ubicado en el municipio de Mixco, Guatemala. Por solicitud de los propietarios, la ubicación exacta se mantiene confidencial. Como criterio de inclusión se consideró que el agua presenta una concentración inicial de arsénico superior al límite establecido en la Norma COGUANOR NTG 29001; se excluyeron muestras previamente tratadas o provenientes de fuentes distintas al pozo seleccionado.

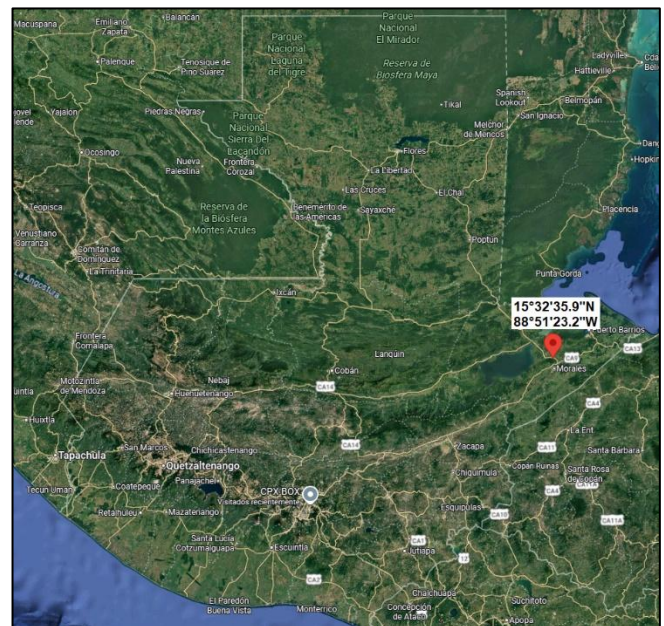
Confidencialidad

El muestreo se realizó con autorización de los propietarios del pozo. Para resguardar su privacidad y seguridad, la ubicación exacta no se consigna en el manuscrito ni se incluyen datos que permitan identificar el sitio.

La arcilla ferrosa se recolectó a un costado de la carretera CA-13, aproximadamente en el km 251.7, en ruta hacia Río Dulce, municipio de Morales, departamento de Izabal ($15^{\circ}32'35.9''$ N; $88^{\circ}51'23.2''$ O) (Ver figura 1).

La arcilla ferrosa se caracterizó mediante análisis químico elemental por espectrometría de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES). El material presentó una composición rica en aluminio (9.91% en masa) y hierro (5.83% en masa), lo que confirma una matriz arcillosa con presencia significativa de compuestos férricos. Además, se identificaron potasio (0.94%), magnesio (1.43%), sodio (1.12%) y manganeso (0.16%) en menores proporciones.

Figura 1. Ubicación geográfica del sitio donde se recolectó la muestra de arcilla



Fuente: Google Earth con información del autor.

En relación con elementos traza, se detectaron bario (455 mg/kg), cromo (181 mg/kg), zinc (140 mg/kg), plomo (135 mg/kg), cobre (65 mg/kg) y cobalto (29 mg/kg). Plata, cadmio, níquel, fósforo y bismuto no se detectaron (bajo los límites del método). La proporción de hierro respalda el potencial del material para favorecer procesos de coagulación y adsorción durante la remoción de arsénico.

Antes de su aplicación, la arcilla se sometió a un pretratamiento físico de secado y tamizado con malla No. 10 (2.00 mm), con el fin de homogeneizar el tamaño de partícula y retirar impurezas gruesas. No se realizó activación química ni térmica; por tanto, el material se utilizó en su estado natural.

Se establecieron ocho condiciones experimentales, producto de la combinación de cuatro concentraciones de arcilla ferrosa (25, 50, 75 y 100 g/L) y dos tiempos de sedimentación.

Cada condición se ejecutó por duplicado (dos réplicas), para un total de 16 muestras tratadas, además de una muestra cruda utilizada como referencia.

Las mediciones de laboratorio incluyeron:

- Determinación de arsénico por espectrometría de absorción atómica con generación de hidruros.
- Determinación de hierro total.
- Turbidímetro para turbidez (NTU).
- Colorímetro para color real y aparente (Pt-Co).
- Conductímetro para conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$).
- Potenciómetro para pH.

El color se reportó como color aparente y color real. El color aparente considera compuestos disueltos y partículas en suspensión; el color real se determinó después de remover los sólidos suspendidos, por lo que representa únicamente los compuestos disueltos.

Los análisis fueron realizados por un laboratorio acreditado externo, siguiendo métodos estandarizados.

Trabajo de campo

Se recolectó una muestra de agua del pozo mecánico y se conservó bajo condiciones adecuadas para minimizar cambios en sus parámetros fisicoquímicos. Paralelamente, se recolectó la arcilla ferrosa utilizada como coagulante en el sitio descrito previamente.

El procedimiento experimental consistió en:

- Tamizar la arcilla con malla No. 10 (2.00 mm).
- Preparar las concentraciones de arcilla ferrosa (25, 50, 75 y 100 g/L) usando agua del pozo.
- Aplicar cada concentración de arcilla ferrosa (g/L) a la muestra de agua en recipientes controlados y homogeneizar por agitación.
- Dejar sedimentar durante 30 o 60 min, según el tratamiento.
- Separar el sobrenadante por decantación y filtrar mediante elemento cerámico de porosidad controlada.
- Enviar las muestras tratadas al laboratorio externo para la determinación de los parámetros fisicoquímicos.

Preparación de las concentraciones de arcilla ferrosa

Se prepararon cuatro concentraciones de arcilla ferrosa (25, 50, 75 y 100 g/L) mediante una relación masa-volumen. Por ejemplo, para 25 g/L se mezclaron 50 g de arcilla ferrosa con 2 L de agua del pozo. El mismo criterio se aplicó al resto de las concentraciones, ajustando proporcionalmente la masa de arcilla.

Mezclado y sedimentación

Cada mezcla se agitó manualmente durante aproximadamente 1 min para homogeneizar el coagulante. El tiempo de sedimentación se contabilizó a partir del cese de la agitación, evaluándose dos condiciones: 30 y 60 min. Para cada condición se realizaron dos réplicas.

Obtención de las muestras tratadas

Transcurrido el tiempo de sedimentación establecido, el agua sobrenadante se separó por decantación, recuperándose aproximadamente un litro de cada tratamiento. Este volumen se filtró mediante un filtro cerámico de porosidad controlada, obteniéndose así las muestras finales para análisis.

Análisis de datos

El análisis se efectuó mediante estadística descriptiva no inferencial, considerando los valores observados en cada una de las dos réplicas por tratamiento. Debido a que los análisis de arsénico y hierro total fueron realizados bajo mediciones únicas por réplica, no fue posible aplicar técnicas de estadística inferencial ni pruebas de significancia.

En consecuencia, los resultados se interpretaron mediante:

- Comparación directa entre tratamientos.
- Identificación de tendencias en la remoción de arsénico.
- Evaluación del comportamiento de los parámetros fisicoquímicos frente a variaciones en la concentración de coagulante (g/L) y el tiempo de sedimentación.

Resultados

Los resultados obtenidos permiten evaluar el comportamiento de la arcilla ferrosa como coagulante en la remoción de arsénico y en la modificación de los parámetros fisicoquímicos del agua tratada. A continuación, se describen los resultados obtenidos.

Arsénico

En la tabla 1 se presenta la concentración inicial de arsénico (0.057 mg/L) y los valores obtenidos después del tratamiento con las diferentes concentraciones de arcilla ferrosa (g/L) y tiempos de sedimentación. En general, todas las muestras tratadas mostraron una disminución del metaloide, con porcentajes de remoción entre 47.37% y 80.70%.

Tabla 1. Remoción de arsénico (mg/L)

Muestra evaluada	Resultado de muestra evaluada	Resultado de Muestra cruda de agua	Porcentaje de remoción
25 g/L 30 min	0.028	0.057	50.88%
50 g/L 30 min	0.023	0.057	59.65%
75 g/L 30 min	0.016	0.057	71.93%
100 g/L 30 min	0.014	0.057	75.44%
25 g/L 30 min	0.030	0.057	47.37%
50 g/L 30 min	0.017	0.057	70.18%
75 g/L 30 min	0.012	0.057	78.95%
100 g/L 30 min	0.012	0.057	78.95%
25 g/L 60 min	0.013	0.057	77.19%
50 g/L 60 min	0.014	0.057	75.44%
75 g/L 60 min	0.011	0.057	80.70%
100 g/L 60 min	0.012	0.057	78.95%
25 g/L 60 min	0.012	0.057	78.95%
50 g/L 60 min	0.013	0.057	77.19%
75 g/L 60 min	0.011	0.057	80.70%
100 g/L 60 min	0.013	0.057	77.19%

Las mayores eficiencias de remoción se registraron con 75 g/L y 100 g/L de arcilla ferrosa y 60 min de sedimentación, alcanzando una concentración mínima de 0.011 mg/L y una remoción máxima de 80.70%.

Ninguno de los tratamientos alcanzó el límite establecido por la Norma COGUANOR NTG 29001; sin embargo, se observó una reducción consistente en todos los casos.

La desviación estándar calculada para las réplicas fue baja en la mayoría de los tratamientos, lo que evidencia una alta consistencia experimental.

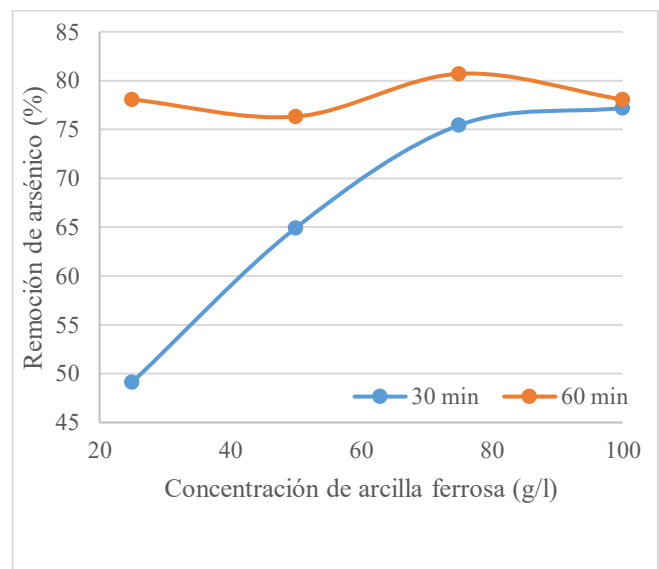
La variabilidad entre réplicas para cada combinación de concentración (g/L) y tiempo de sedimentación se resume en la tabla 2.

Tabla 2. Variabilidad de la remoción de arsénico entre réplicas

Concentración (g/L)	Tiempo (min)	Promedio (%)	Rango (%)	Dev. Estándar (%)
25	30	49.13	3.51	2.48
50	30	64.92	10.53	7.45
75	30	75.44	7.02	4.96
100	30	77.20	3.51	2.48
25	60	78.07	1.76	1.24
50	60	76.32	1.75	1.24
75	60	80.70	0	0
100	60	78.07	1.76	1.24

En la figura 2 se muestra la variación del porcentaje de remoción de arsénico en función de la concentración de arcilla ferrosa (g/L) y del tiempo de sedimentación.

Figura 2. Remoción de arsénico en función de la concentración (g/L) y el tiempo de sedimentación



Color Real y Aparente

Tanto el color aparente como el color real no mostraron variaciones relevantes entre la muestra de agua cruda y las muestras tratadas en la investigación, en ninguna de las condiciones evaluadas. En todos los casos, los valores se mantuvieron por debajo del límite de detección (<1 unidad Pt-Co), lo que indica que el proceso de coagulación-sedimentación con arcilla ferrosa no modificó perceptiblemente el color del agua. En consecuencia, este parámetro ya cumplía con los límites aceptables para consumo humano desde la condición inicial.

Conductividad Eléctrica

De acuerdo con la tabla 3, la conductividad eléctrica presentó variaciones mínimas entre los tratamientos. En algunos casos se observaron ligeros aumentos y, en otros, disminuciones respecto al valor inicial (371 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Las variaciones se mantuvieron dentro de rangos esperados y los valores obtenidos continuaron cumpliendo con la normativa. El incremento más notable ocurrió en el tratamiento de 25 g/L y 30 min, mientras que la mayor disminución se registró con 100 g/L y 60 min, donde la conductividad alcanzó su valor más bajo.

Tabla 3. Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)

Muestra evaluada	Resultado de muestra evaluada	Resultado de Muestra cruda de agua	Variación (%)
25 g/L 30 min	387	371	-4.31%
50 g/L 30 min	397	371	-7.01%
75 g/L 30 min	374	371	-0.81%
100 g/L 30 min	370	371	0.27%
25 g/L 30 min	408	371	-9.97%
50 g/L 30 min	384	371	-3.50%
75 g/L 30 min	390	371	-5.12%
100 g/L 30 min	375	371	-1.08%
25 g/L 60 min	360	371	2.96%
50 g/L 60 min	351	371	5.39%
75 g/L 60 min	361	371	2.70%
100 g/L 60 min	338	371	8.89%
25 g/L 60 min	372	371	-0.27%
50 g/L 60 min	363	371	2.16%
75 g/L 60 min	363	371	2.16%
100 g/L 60 min	309	371	16.71%

Potencial de Hidrógeno (pH)

Los valores de pH presentados en la tabla 4 muestran que, en general, los tratamientos mantuvieron el agua en un rango ligeramente alcalino, entre 8.68 y

8.85 unidades. Únicamente el tratamiento de 100 g/L y 30 min registró un valor atípico (6.77), que no se repitió en las demás combinaciones.

Tabla 4. Potencial de hidrógeno (pH)

Muestra evaluada	Resultado de muestra evaluada	Resultado de Muestra cruda de agua
25 g/L 30 min	8.78	8.12
50 g/L 30 min	8.73	8.12
75 g/L 30 min	8.73	8.12
100 g/L 30 min	8.69	8.12
25 g/L 30 min	8.85	8.12
50 g/L 30 min	8.79	8.12
75 g/L 30 min	8.74	8.12
100 g/L 30 min	6.77	8.12
25 g/L 60 min	8.69	8.12
50 g/L 60 min	8.74	8.12
75 g/L 60 min	8.73	8.12
100 g/L 60 min	8.75	8.12
25 g/L 60 min	8.78	8.12
50 g/L 60 min	8.77	8.12
75 g/L 60 min	8.76	8.12
100 g/L 60 min	8.68	8.12

Turbidez

La turbidez no mostró cambios relevantes: tanto el agua cruda como las muestras tratadas presentaron valores inferiores a 1 NTU. Esto sugiere que el agua inicial tenía baja turbidez y que la aplicación de arcilla ferrosa no alteró significativamente este parámetro, manteniéndose dentro de rangos aceptables según la normativa.

Hierro

Con base en los tratamientos con mayor remoción de arsénico (75 y 100 g/L), se determinó hierro total para verificar si la aplicación de la arcilla ferrosa incrementaba este parámetro. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 5.

La tabla 5 presenta los valores de hierro total para los tratamientos con mayor remoción de arsénico. Los resultados finales se ubicaron entre no detectable y 0.04 mg/L, por debajo de la concentración medida en el agua cruda (2.10 mg/L). En este sentido, la aplicación de arcilla ferrosa no incrementó el contenido de hierro en el agua tratada.

Tabla 5. Hierro total (mg/L)

Muestra evaluada	Resultado de muestra evaluada (mg/L)
75 g/L 30 min	0.00
100 g/L 30 min	0.03
75 g/L 60 min	0.01
100 g/L 60 min	0.04
Agua cruda	2.10*

En conjunto, la arcilla ferrosa redujo el arsénico en todas las muestras tratadas, alcanzando una remoción máxima de 80.70%, aunque sin cumplir el límite establecido por la Norma COGUANOR NTG 29001. Las concentraciones de 75 y 100 g/L combinadas con 60 min de sedimentación presentaron el mejor desempeño. Los parámetros de color, turbidez, pH y conductividad se mantuvieron dentro de rangos aceptables, sin cambios relevantes, y no se observó incremento del hierro total en el agua tratada.

Discusión de resultados

Los resultados obtenidos muestran que la arcilla ferrosa logró reducir de manera importante la concentración de arsénico en el agua subterránea, con remociones entre 47.37% y 80.70% y una concentración mínima de 0.011 mg/L. Aunque estos valores no permitieron alcanzar el límite de la Norma COGUANOR NTG 29001, la tendencia confirma el potencial del material como coagulante natural en condiciones de laboratorio. El mejor desempeño se observó con 75–100 g/L y 60 min de sedimentación, lo que sugiere que el incremento de la dosis y del tiempo de contacto favorece la captura del arsénico y su posterior separación.

Desde el punto de vista fisicoquímico, la remoción observada es compatible con mecanismos combinados de coagulación–coprecipitación y adsorción sobre fases ricas en hierro. La fracción férrica del material (5.83% en masa) puede promover la formación de hidróxidos/oxihidróxidos de hierro en el agua, los cuales presentan alta afinidad por especies de arsénico y favorecen su incorporación a flóculos que sedimentan. Adicionalmente, la matriz arcillosa aporta superficie específica y sitios de sorción donde el arsénico puede retenerse por interacción superficial. En conjunto, estos procesos explican la disminución progresiva de arsénico al aumentar la concentración de arcilla y el tiempo de sedimentación, observada en los tratamientos evaluados.

Estos resultados guardan relación con lo reportado por Veli Jiménez y Álvarez Camarena (2014), quienes obtuvieron remociones superiores al 90% mediante el uso de arcilla natural bajo condiciones específicas de adsorción. La menor eficiencia del presente estudio podría asociarse a diferencias en la calidad del agua (matriz iónica y alcalinidad), en la mineralogía y porosidad del material, y en las condiciones de operación (dosis, tiempo de contacto, y ausencia de control de pH).

Dado que la arcilla guatemalteca no fue caracterizada mineralógicamente (por ejemplo, por XRD/SEM) ni se evaluó superficie específica, no es posible atribuir la diferencia a un factor único. Aun así, el desempeño alcanzado es relevante al tratarse de un material local utilizado sin activación química ni térmica, lo que mejora su potencial de aplicación en contextos de bajo costo.

En cuanto al pH, la mayoría de las muestras permaneció en un rango ligeramente alcalino (8.68–8.85), lo cual es consistente con el valor inicial del agua cruda. No obstante, se registró un valor atípico de 6.77 en el tratamiento de 100 g/L y 30 min. Dado que esta condición no se repitió en el resto de los tratamientos, el resultado debe interpretarse con cautela y podría asociarse a variabilidad del muestreo, heterogeneidad del material o a una desviación en el análisis (por ejemplo, durante la medición o conservación). Para estudios posteriores se recomienda repetir esta condición e incorporar controles de calidad analítica (blancos, duplicados y verificación instrumental) para confirmar si existe un efecto real de la dosis elevada sobre el pH.

Los demás parámetros fisicoquímicos se mantuvieron estables después del tratamiento. El color aparente y real permaneció por debajo del límite de detección (<1 Pt–Co) y la turbidez fue <1 NTU en todas las muestras, lo que indica que el proceso no generó deterioro apreciable en estas variables. La conductividad eléctrica mostró variaciones pequeñas respecto al valor inicial (371 μ S/cm), sin evidenciar incrementos que sugieran liberación significativa de sales al agua. Un hallazgo relevante desde la perspectiva sanitaria fue que el hierro total no aumentó en los tratamientos evaluados (valores finales entre no detectable y 0.04 mg/L), lo cual es favorable porque evita introducir un parámetro secundario de

incumplimiento y sugiere que la separación sólido-líquido fue efectiva bajo las condiciones ensayadas.

Desde el punto de vista teórico, la coagulación con especies férricas y la adsorción/captura sobre hidróxidos u oxihidróxidos de hierro están influenciadas por variables de operación como el pH, la dosis del material (y, por tanto, la cantidad de fases férricas disponibles), la intensidad/tiempo de mezcla y el tiempo de contacto (Hao et al., 2018; Inam et al., 2021; Amiri et al., 2022). En varios sistemas de coagulación con sales férricas se ha observado que la remoción de As(V) tiende a ser mayor en un intervalo cercano a pH neutro ($\approx 6-7$) y puede disminuir a pH más alcalinos, mientras que el comportamiento puede variar con la especie de arsénico y la matriz del agua (Inam et al., 2021). Por ello, el rango alcalino observado en la mayoría de los tratamientos ($\approx 8.7-8.9$) podría haber limitado parcialmente la eficiencia alcanzable en comparación con ensayos realizados bajo condiciones de pH optimizadas. Este planteamiento se presenta como una explicación plausible sustentada en la literatura, no como una conclusión experimental del presente estudio, ya que el diseño no incluyó ajuste sistemático de pH ni la evaluación controlada de variables de mezcla/tiempo de contacto (Inam et al., 2021; Amiri et al., 2022).

En conjunto, los resultados sugieren que la arcilla ferrosa puede contribuir a disminuir el arsénico en agua subterránea; sin embargo, para incrementar su desempeño y evaluar su reproducibilidad se requieren estudios complementarios. En particular, se recomienda: (i) caracterizar mineralógicamente la arcilla (p. ej., XRD/SEM y superficie específica) para relacionar composición y desempeño; (ii) optimizar condiciones de operación (control de pH, tiempos de contacto y condiciones de mezcla); y (iii) ampliar el número de réplicas y el rango de condiciones experimentales para sustentar conclusiones con mayor robustez.

Asimismo, desde una perspectiva aplicada, la arcilla ferrosa podría emplearse como una etapa preliminar de tratamiento en sistemas pequeños o comunitarios, orientada a reducir parcialmente el arsénico antes de incorporar una etapa de pulimiento (por ejemplo, medios adsorbentes específicos, óxidos férricos granulares u otras tecnologías) que permita cumplir con el valor normativo. La factibilidad de implementación

dependerá de la disponibilidad local del material, de un control operativo sencillo (dosis y tiempos) y de la gestión adecuada de los lodos generados.

Conclusiones

Bajo las condiciones evaluadas, la arcilla ferrosa aplicada como coagulante natural permitió disminuir la concentración de arsénico en el agua subterránea, con remociones entre 47.37% y 80.70% y una concentración mínima de 0.011 mg/L. No obstante, ningún tratamiento alcanzó el límite establecido por la Norma COGUANOR NTG 29001, por lo que su uso, en el estado actual del proceso, se perfila como una alternativa de reducción parcial y no como una solución única de cumplimiento normativo.

En relación con la calidad fisicoquímica del agua, los parámetros de pH, turbidez, color y conductividad eléctrica se mantuvieron sin cambios relevantes tras el tratamiento, permaneciendo dentro de rangos aceptables. Además, en los tratamientos en los que se evaluó hierro total (75 y 100 g/L), no se observó incremento de este parámetro en el agua tratada, lo cual es favorable desde la perspectiva sanitaria y sugiere una adecuada separación sólido-líquido bajo las condiciones ensayadas.

Entre las principales limitaciones del estudio se incluyen: la ausencia de caracterización mineralógica y textural de la arcilla (p. ej., identificación de fases y superficie específica), el número reducido de réplicas ($n=2$) y la no optimización de variables operativas (control de pH, condiciones de mezcla y tiempos de contacto adicionales). Se recomienda que trabajos futuros incorporen estos aspectos y evalúen esquemas de tratamiento combinados, utilizando la arcilla ferrosa como etapa preliminar seguida de una etapa de pulimiento (adsorbentes o medios férricos), con el fin de aumentar la probabilidad de cumplimiento de la normativa vigente.

Financiamiento

Este trabajo fue financiado con recursos propios.

Conflicto de interés

El autor declara no tener ningún tipo de conflicto de interés que pudiera haber influido en esta investigación.

Como citar este documento

García Sandoval, M. R. (2025). Arcilla ferrosa como coagulante para la reducción de arsénico en agua subterránea. *Agua, Saneamiento & Ambiente*, 20(1), 1-9. <https://doi.org/10.36829/08ASA.v20i1.1945>

Consentimiento informado

No aplica.

Contribuciones de autor

Conceptualización, trabajo de campo, tabulación, análisis y escritura: M.R.G.S.

Referencias

- Argueta López, A. E. (2009). *Aprovechamiento del agua subterránea y manejo sostenible de los recursos hidráulicos, en el Campus Central de la Universidad de San Carlos de Guatemala* [Tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala]. http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_3045_C.pdf
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry. (2007). *Toxicological profile for arsenic*. U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service. <https://doi.org/10.15620/cdc:11481>
- Chiavola, A., D'Amato, E., Sirini, P., Caretti, C., & Gori, R. (2019). Arsenic removal from a highly contaminated groundwater by a combined coagulation-filtration-adsorption process. *Water, Air, & Soil Pollution*, 230, Article 87. <https://doi.org/10.1007/s11270-019-4142-9>
- Inam, M. A., Khan, R., Lee, K.-H., & Wie, Y.-M. (2021). Removal of arsenic oxyanions from water by ferric chloride—Optimization of process conditions and implications for improving coagulation performance. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(18), 9812. <https://doi.org/10.3390/ijerph18189812>
- Amiri, S., Vatanpour, V., & He, T. (2022). Optimization of coagulation-flocculation process in efficient arsenic removal from highly contaminated groundwater by response surface methodology. *Molecules*, 27(22), 7953. <https://doi.org/10.3390/molecules27227953>
- Mayorga Moreno, M. P. (2013). *Arsénico en aguas subterráneas: Su transferencia al suelo y a la planta* [Tesis doctoral, Universidad de Valladolid]. <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/2821>
- Pooi, C. K., & Ng, H. Y. (2018). Review of low-cost point-of-use water treatment systems for developing communities. *npj Clean Water*, 1, Article 11. <https://doi.org/10.1038/s41545-018-0011-0>
- Hao, L., Liu, M., Wang, N., & Li, G. (2018). A critical review on arsenic removal from water using iron-based adsorbents. *RSC Advances*, 8, 39545–39560. <https://doi.org/10.1039/c8ra08512a>
- Romero Rojas, J. A. (1999). *Tratamiento de aguas residuales: Teoría y principios de diseño*. Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Smith Meléndez, E. F. (2007). *Remoción de arsénico en el agua a nivel de laboratorio aplicando como medio filtrante óxido de hierro* [Tesis de maestría, Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala]. http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0386_MT.pdf
- Veli Jiménez, L. E., & Álvarez Camarena, G. L. (2014). *Remoción de arsénico mediante arcilla natural del agua procedente del manantial de Quero-Jauja* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional del Centro del Perú]. <https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/3719>
- COGUANOR. (s. f.). *NTG 29001: Agua potable. Requisitos*. Comisión Guatemalteca de Normas.
- Sepúlveda Saa, R. (2009). El arsénico en la contaminación de aguas subterráneas. *Ciencia UANL*, 12(3), 239–244. <https://www.redalyc.org/pdf/402/40211814002.pdf>