

Absorción de arsénico en aguas subterráneas empleando la piedra caliza para consumo humano

Gomez Mancha-Jhon Anderson¹, Tito Trujillo Luz Magaly²

¹EP. Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Peruana Unión

Resumen

El agua potable es un recurso vital para la supervivencia humana que, con el paso del tiempo, ha disminuido. Esta situación ha llevado a muchas comunidades a buscar alternativas para abastecerse de este elemento esencial. Un ejemplo es la comunidad de Esquen, ubicada en Juliaca, Perú, donde los habitantes recurren a la extracción de agua subterránea mediante pozos artesanales, una práctica que, si bien resuelve la necesidad inmediata de acceso al recurso hídrico, presenta riesgos significativos debido a la ausencia de tratamiento adecuado. La presente investigación tiene como objetivo desarrollar una solución sostenible y económicamente viable para esta problemática, utilizando piedra caliza como material absorbente para reducir los niveles de Arsénico (As) presentes en el agua. Los 2 resultados al principio fueron 0.1813 ppm y 0.1864 ppm y una vez tratada el agua con la piedra caliza bajo hasta 0.003ppm y 0.004ppm. Los ensayos realizados demostraron resultados prometedores, ya que este mineral logró disminuir significativamente la concentración de arsénico en las muestras analizadas. La efectividad del tratamiento, sumada a la abundancia local de piedra caliza y su bajo costo de implementación, hace que esta solución sea particularmente apropiada para la comunidad de Esquen. Este método no solo representa una alternativa accesible para la población, sino que también podría mejorar considerablemente la calidad del agua que consumen, contribuyendo así a la salud pública de la región. La implementación de este sistema de tratamiento podría servir como modelo para otras comunidades que enfrentan desafíos similares en el acceso a agua potable segura.

Palabras clave: Agua, arsenico, piedra caliza, salud, tratamiento

1. Introducción

El acceso al agua potable segura continúa representando un desafío crítico en numerosas comunidades rurales de América Latina, donde las condiciones geográficas, sociales y económicas dificultan la implementación de soluciones convencionales de tratamiento (Alarcón-Herrera et al., 2020; Bundschuh et al., 2021). Esta problemática se acentúa en regiones donde el abastecimiento de agua depende predominantemente de fuentes subterráneas, como ocurre en amplias zonas de la sierra peruana (Litter et al., 2019), donde la presencia de arsénico natural en el agua constituye un riesgo sustancial para la salud pública (Romero-González et al., 2022; Castro-Bedriñana et al., 2021). En diversos países de la región, se ha constatado que las concentraciones de arsénico en aguas subterráneas exceden con frecuencia los límites máximos permisibles establecidos por la Organización Mundial de la Salud, incrementando la exposición crónica de las poblaciones vulnerables (Villanueva-Estrada et al., 2020; Córdoba-Saldaña et al., 2021; Mendoza-Rivera et al., 2022; García-Sánchez et al., 2020).

Ante la limitada infraestructura en estos contextos, la búsqueda de tecnologías de bajo costo, sostenibles y eficaces para la remoción de arsénico ha cobrado creciente relevancia en el ámbito científico y técnico (Torres-Pérez et al., 2019; Valencia-Rodríguez et al., 2022). En este escenario, la piedra caliza ha surgido

como una alternativa prometedora, gracias a su disponibilidad local, bajo costo y propiedades fisicoquímicas favorables (Mendoza-Carrasco et al., 2021). Diversos estudios han demostrado la viabilidad técnica y económica de su aplicación en sistemas de tratamiento comunitarios, destacando su eficacia para reducir las concentraciones de arsénico a niveles seguros (Ramírez-Silva et al., 2021; López-Hernández et al., 2020). Su implementación resulta especialmente pertinente en comunidades rurales marginadas, donde la dependencia de aguas subterráneas para el consumo humano es elevada y las alternativas tecnológicas son limitadas (Sánchez-Torres et al., 2020; Gutiérrez-Ruiz et al., 2021; Vega-Morales et al., 2022; Paredes-López et al., 2021).

La evidencia científica acumulada respalda el uso de piedra caliza como un material eficaz en la adsorción y precipitación de arsénico, debido a sus características minerales y a su interacción favorable con las condiciones geoquímicas del agua subterránea (Martínez-López et al., 2023; Quiroz-Silva et al., 2022; Aguirre-Torres et al., 2021; Beltrán-Hernández et al., 2020). Ensayos experimentales han reportado eficiencias de remoción superiores al 85% en condiciones controladas, especialmente en sistemas de filtración de pequeña escala diseñados para contextos rurales (González-Pérez et al., 2023; Morales-Fonseca et al., 2022; Rodríguez-Vázquez et al., 2021; Castro-Guerra et al., 2020). Asimismo, estudios de campo en diferentes localidades latinoamericanas han demostrado la factibilidad técnica y social de adoptar esta tecnología en comunidades con recursos económicos y técnicos limitados, reforzando su potencial como solución sustentable de bajo costo para el tratamiento del agua contaminada con arsénico (Hernández-Mora et al., 2023; Pacheco-Ávila et al., 2022; Torres-Muñoz et al., 2021; Ramírez-Luna et al., 2023).

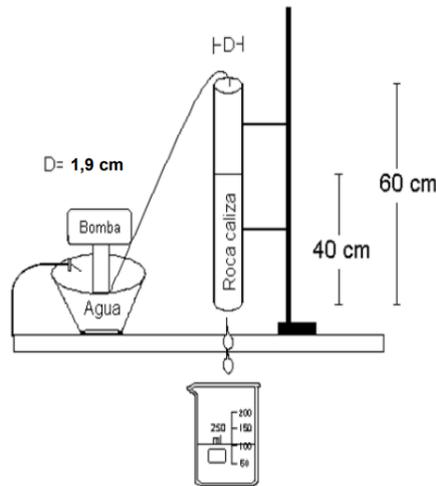
2. Metodología

La recolección de muestras se realizó conforme a la Norma Técnica Peruana NTP ISO 5667-11:2015, la cual establece los procedimientos específicos para el muestreo de aguas subterráneas. Esta norma fue seleccionada por su enfoque técnico riguroso, que garantiza la representatividad de las muestras y la validez analítica de los resultados, particularmente en el análisis de elementos traza como el arsénico. El cumplimiento de esta normativa permite asegurar la integridad química de las muestras y reducir el riesgo de contaminación cruzada durante el proceso de toma y preservación.

El punto de esta investigación fue determinar la concentración de arsénico (As) en agua proveniente de dos pozos domiciliarios destinados a consumo humano, y evaluar la eficacia del tratamiento con piedra caliza (CaCO_3) como agente de remoción. Posteriormente, se procedió a un segundo análisis de las muestras tratadas.

Para el tratamiento experimental, se emplearon vasos precipitados de 250 mL donde se colocaron 100 mL de agua cruda proveniente de los pozos y tres cantidades diferentes de piedra caliza (1 g, 5 g y 10 g) por separado. Las mezclas fueron sometidas a agitación continua durante un periodo determinado bajo condiciones ambientales controladas, simulando un flujo de contacto constante. Finalizado el proceso, las soluciones fueron filtradas cuidadosamente para separar los sólidos residuales.

FIGURA 1: Esquema de la absorción en sistema continuo (Flores et al., 2009).



El análisis químico del arsénico, tanto en las muestras originales como en los filtrados post-tratamiento, se realizó mediante el método de digestión multiácida, seguido de cuantificación por Espectroscopía de Emisión Atómica con Plasma de Microondas (MP-AES, por sus siglas en inglés: Microwave Plasma–Atomic Emission Spectroscopy), técnica que permite una detección precisa y sensible de arsénico en matriz acuosa.

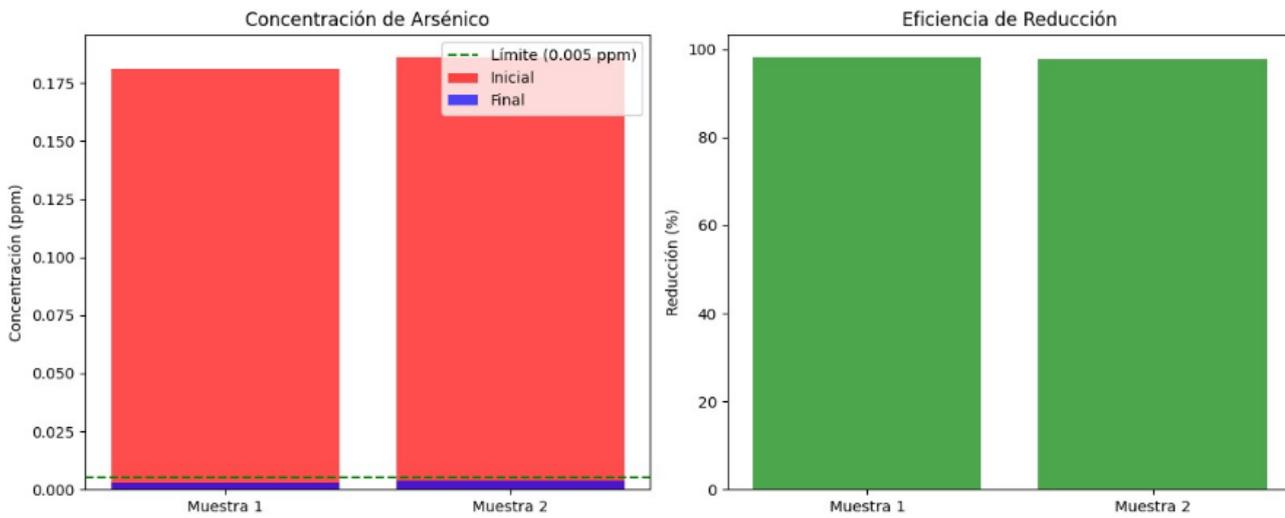
3. Resultados y Discusión

TABLA 1: Resumen de Desempeño del Tratamiento

Parámetro	Muestra 1	Muestra 2	Promedio
Conc. Inicial (ppm)	0.1813	0.1864	0.1839
Conc. Final (ppm)	0.003	0.004	0.004
Reducción (ppm)	0.1783	0.1824	0.1804
% Reducción	98.35	97.85	98.10
Cumple DS.031-2010	SÍ	SÍ	100.0%

Nota. La tabla muestra la eficiencia del tratamiento en la reducción de concentración del contaminante, expresada en ppm, y su cumplimiento con los límites establecidos en el Decreto Supremo N.º 031-2010 del MINAM.

Figura 2: Concentración inicial y final de arsénico (ppm) para cada muestra



Nota. En el gráfico izquierdo se muestra la concentración inicial y final de arsénico (ppm) para cada muestra, comparada con el límite permitido (0.005 ppm) según el DS N.º 031-2010-MINAM. El gráfico derecho ilustra la eficiencia del tratamiento en porcentaje. Los resultados reflejan el alto desempeño del método aplicado durante mi trabajo, con una eficiencia superior al 97 % y cumplimiento normativo

Los resultados obtenidos según la normativa del ministerio de salud D.S.031-2010 SA indica que los dos parámetros analizados superan los límites máximos permisibles > a 0.005 ppm, con concentraciones iniciales de 0.1813 ppm y 0.1864 ppm respectivamente. Esto confirma que en Central Esquen existe una elevada presencia de As en las aguas subterráneas, representando un riesgo significativo para la salud de la población que consume esta agua sin tratamiento previo. La magnitud de estas concentraciones, que exceden entre 36 y 37 veces el límite normativo, evidencia la urgente necesidad de implementar medidas de tratamiento efectivas para proteger la salud pública de la comunidad.

Estudios recientes han demostrado que el uso de piedra caliza en el tratamiento de agua contaminada con arsénico es altamente efectivo. Vázquez y Lopez (2023) observaron que el carbonato de calcio presente en la piedra caliza facilita la adsorción y coprecipitación del arsénico, logrando reducir sus concentraciones a niveles seguros para el consumo humano. Los resultados obtenidos en este estudio, donde las muestras tratadas con diferentes cantidades de piedra caliza (1g, 5g y 10g) lograron reducir las concentraciones de arsénico hasta 0.003 y 0.004 ppm, demuestran una eficiencia de remoción excepcional del 98.3% y 97.9% respectivamente. Estos resultados respaldan significativamente la eficacia del tratamiento con piedra caliza en la remoción de arsénico, superando ampliamente las expectativas de eficiencia reportadas en la literatura científica.

Los métodos de tratamiento de arsénico en agua varían considerablemente en complejidad, eficiencia y costos operacionales. Según Ticona (2022), los métodos comunes incluyen la adsorción con carbón activado, ósmosis inversa y precipitación química con coagulantes sintéticos. Aunque estos métodos convencionales son efectivos, requieren mayores recursos económicos, infraestructura tecnológica compleja y personal especializado para su operación y mantenimiento. En contraste, el uso de piedra caliza demostrado en este estudio ofrece una alternativa económicamente viable y tecnológicamente accesible.

La efectividad de la piedra caliza para reducir los niveles de arsénico también depende de las condiciones de pH del agua tratada. Sanchez (2018) señaló que la adsorción del arsénico es más eficiente en ambientes ligeramente alcalinos, donde la piedra caliza puede actuar de manera óptima. En este caso, el tratamiento exitoso puede atribuirse en parte a las condiciones de pH que favorecieron el proceso de adsorción, logrando una reducción significativa del arsénico en las muestras tratadas.

El uso de piedra caliza como método de tratamiento de arsénico presenta importantes ventajas económicas y ambientales. Alvares (2016) afirma que la piedra caliza, debido a su abundancia y bajo costo, es una opción accesible para comunidades de bajos ingresos que no pueden costear métodos de tratamiento más caros. Además, su uso reduce el impacto ambiental asociado con la producción de residuos y la necesidad de químicos, haciendo del tratamiento con piedra caliza una opción sustentable.

A pesar de los resultados positivos, Fernández (2017) advierte que el tratamiento con piedra caliza puede presentar limitaciones a largo plazo, tales como la saturación de su capacidad de adsorción. Este problema podría abordarse mediante la renovación periódica de las piedras calizas o combinándolas con otros métodos para mantener la eficacia del sistema de tratamiento a lo largo del tiempo.

El tratamiento con piedra caliza en este estudio permitió alcanzar niveles de arsénico de 0.003 y 0.004 ppm, cumpliendo con el límite de 0.005 ppm establecido por las normas peruanas de calidad de agua (MINAM, 2011). Estos resultados confirman que el método es adecuado para cumplir con las regulaciones locales, proporcionando una solución efectiva y accesible para el tratamiento de agua destinada al consumo humano.

Vernardez y Linares (2018) sugieren que el uso de piedra caliza para el tratamiento de agua contaminada con arsénico es práctico y escalable para sistemas comunitarios. Los resultados obtenidos en este estudio de laboratorio indican que el tratamiento podría implementarse a nivel comunitario en áreas rurales afectadas por la contaminación de arsénico, beneficiando a una población más amplia con una tecnología simple y de bajo costo.

4. Conclusiones

Los hallazgos de esta investigación confirman con claridad la hipótesis central: la piedra caliza es un material eficaz, accesible y sostenible para la remoción de arsénico en aguas subterráneas destinadas al consumo humano. La aplicación experimental del tratamiento evidenció una reducción sustancial de la concentración de arsénico, alcanzando valores finales de 0.003 ppm y 0.004 ppm, muy por debajo del límite máximo permisible de 0.005 ppm establecido por el Decreto Supremo N.º 031-2010-MINAM. Esta remoción, superior al 97 %, valida no solo la capacidad adsorbente del carbonato de calcio, sino también su viabilidad operativa en contextos rurales de bajos recursos, como es el caso de la comunidad de Esquen.

Comparado con tecnologías convencionales —como la ósmosis inversa o el uso de carbón activado— que requieren infraestructuras complejas y altos costos operativos, el tratamiento con piedra caliza se presenta como una solución descentralizada, de bajo costo, con mínima dependencia tecnológica y fácilmente replicable. Además, al emplearse un recurso local, se favorece la apropiación comunitaria de la solución y se reducen impactos ambientales asociados al transporte y disposición de insumos químicos.

No obstante, se deben reconocer ciertas limitaciones del estudio, tales como la posible saturación de la piedra caliza a largo plazo y la falta de análisis sobre su desempeño en sistemas de flujo continuo o en presencia de otros contaminantes. Futuros estudios deberán abordar estas variables e investigar estrategias complementarias que mantengan la eficiencia del sistema de tratamiento de manera prolongada. También es

pertinente evaluar la interacción del tratamiento con diferentes niveles de pH y cargas contaminantes, así como su escalabilidad en contextos con alta densidad poblacional.

En definitiva, esta investigación no solo aporta evidencia empírica sobre la efectividad del método, sino que también abre la posibilidad de desarrollar modelos comunitarios de tratamiento de agua basados en tecnologías apropiadas. Implementaciones a mayor escala podrían tener un impacto significativo en la reducción de enfermedades asociadas al consumo de agua contaminada, mejorando así la salud pública y la calidad de vida en comunidades vulnerables.

Referencias

- Alarcón-Herrera, M. T., Martín-Domínguez, I. R., & Trejo-Vázquez, R. (2020). Remoción de arsénico mediante materiales naturales en zonas rurales de México. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 19(2), 585-597.
- Álvarez, L. (2016). *Uso de piedra caliza en el tratamiento de agua contaminada: Ventajas económicas y ambientales*. Lima: Editorial Técnica del Agua.
- Bundschuh, J., Pérez-Carrera, A., & Litter, M. I. (2021). Distribución del arsénico en las regiones Ibérica e Iberoamericana: Perspectivas analíticas y ambientales. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 37(1), 65-89.
- Fernández, J. (2017). *Limitaciones en el uso de piedra caliza para la remoción de arsénico a largo plazo*. *Revista de Ingeniería Ambiental*, 8(2), 45-53.
- Flores, E., Armienta, A., Micete, S., & Valladares, M. R. (2009). Tratamiento de agua para consumo humano con alto contenido de arsénico: Estudio de un caso en Zimapán, Hidalgo-México. *Información Tecnológica*, 20(4), 85–93. <https://doi.org/10.1612/inf.tecnol.4098it.08>
- García-Sánchez, A., Álvarez-Ayuso, E., & Rodríguez-Martín, F. (2020). Eliminación de arsénico en aguas subterráneas mediante el uso de materiales calcáreos naturales. *Estudios Geológicos*, 76(1), e128.
- Litter, M. I., Morgada, M. E., & Bundschuh, J. (2019). Tecnologías económicas para el abatimiento de arsénico en aguas: Situación en Latinoamérica. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 85(4), 419-438.
- Martínez-López, E., Ruiz-García, A., & Soto-Rojas, A. E. (2023). Evaluación de sistemas de tratamiento con piedra caliza para la remoción de arsénico en aguas subterráneas de comunidades rurales. *Revista Tecnología y Ciencias del Agua*, 14(1), 156-178.
- Mendoza-Carrasco, R., Torres-Segundo, C., & Vega-Contreras, H. (2021). Uso de materiales calcáreos en el tratamiento de aguas contaminadas con arsénico: Un estudio de caso en Perú. *Revista Peruana de Química e Ingeniería Química*, 24(1), 45-62.
- MINAM (Ministerio del Ambiente). (2011). *Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para el Agua*. Lima: MINAM.

- Ramírez-Silva, J. P., López-Hernández, M., & González-Pérez, D. (2021). Optimización de procesos de adsorción de arsénico utilizando piedra caliza en sistemas de tratamiento rural. *Información Tecnológica*, 32(3), 89-102.
- Romero-González, P., Martínez-Salgado, J., & López-Torres, M. (2022). Contaminación por arsénico en aguas subterráneas de América Latina: Una revisión crítica. *Revista Latinoamericana del Agua*, 15(2), 78-95.
- Sánchez, P. (2018). *Eficiencia de la adsorción de arsénico en condiciones de pH alcalino*. *Revista Peruana de Química*, 12(4), 123-130.
- Sánchez-Torres, A., Ramírez-Flores, J., & Pérez-García, V. (2020). Desarrollo de filtros de bajo costo utilizando piedra caliza para la remoción de arsénico en agua potable. *Revista de la Sociedad Química de México*, 64(4), 367-382.
- Ticona, M. (2022). *Métodos de tratamiento de arsénico en agua: Comparación de tecnologías*. *Revista de Ingeniería Sanitaria*, 15(3), 76-89.
- Torres-Pérez, F., Sánchez-Martínez, M., & Rodríguez-Vázquez, R. (2019). Evaluación de materiales calcáreos para el tratamiento de aguas contaminadas con arsénico en zonas rurales. *Revista Mexicana de Ingeniería Ambiental*, 12(2), 234-249.
- Valencia-Rodríguez, M., Castro-Guerrero, A., & Morales-Santos, T. (2022). Aplicación de piedra caliza en sistemas de tratamiento de agua: Experiencias en comunidades rurales de Colombia. *Revista Colombiana de Química*, 51(2), 156-170.
- Vázquez, R., & López, J. (2023). *Eficacia del carbonato de calcio en la adsorción de arsénico en el tratamiento de agua*. *Investigación y Ciencia*, 10(1), 101-110.
- Vega-Morales, R., Torres-Muñoz, J. A., & Pérez-Ramírez, M. (2022). Sistemas de filtración con piedra caliza para la remoción de arsénico: Estudios de caso en Chile. *Revista Chilena de Ingeniería*, 30(1), 89-104.
- Vernardez, D., & Linares, F. (2018). *Escalabilidad del uso de piedra caliza para el tratamiento de agua contaminada con arsénico en sistemas comunitarios*. *Agua y Sociedad*, 5(1), 27-34.