

EVALUACIÓN DE LA REMOCIÓN DE ARSÉNICO DEL AGUA CON ADSORBENTES NATURALES NO METÁLICOS EN UN REACTOR DE LECHO FIJO A ESCALA SEMIPILOTO AYACUCHO 2019

Abrahán F. Trejo Espinoza

Unidad de Investigación e Innovación de Ingeniería Química y Metalurgia
Programa de investigación en Procesos Industriales - Área de Protección y Control Ambiental
E-mail: abraham.trejo@ unsch.edu.pe

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar el grado de remoción de arsénico del agua con adsorbentes naturales no metálicos en un reactor de lecho fijo a escala semipiloto Ayacucho 2019. La muestra agua preparada a partir de arsenito de sodio, 1000 mL y 1 ppm de arsénico, As^{+3} . Para la cuantificación del arsénico se usó la metodología de espectrofotométrica a una longitud de onda de 880 nm, utilizando una gráfica de calibración, ecuación obtenida igual a $y = 0,6065x + 0,0666$; grado de correlación, R^2 igual a 0,9973. La arcilla roja adsorbente de arsénico del agua, fue obtenida del Centro experimental planta piloto de cerámica de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, previamente tratada de tamaño de partícula 630 a 230 μm . Se empleó el tipo de diseño de superficie respuesta, Diseño compuesto central rotatable 2^2 principal, se estudiaron los efectos de 2 factores en 13 ejecuciones, el diseño ha sido ejecutado en un solo bloque y el orden de los experimentos se ha aleatorizado totalmente que maximizan la remoción de arsénico por encima de la región indicada. Los valores óptimos de tiempo de residencia de 27,73 h y cantidad de adsorbente de 471,197 g logran una máxima remoción de arsénico con muestra patrón, valor óptimo 70,98 %.

Palabras clave: remoción de arsénico, arsénico en agua, adsorbentes naturales.

EVALUATION OF THE REMOVAL OF ARSENIC FROM WATER WITH NATURAL NON-METAL ADSORBENTS IN A FIXED BED REACTOR AT A SEMIPILOT SCALE AYACUCHO 2019

ABSTRACT

The objective of this work is to evaluate the degree of removal of arsenic from water with natural non-metallic adsorbents in a fixed bed reactor on a semi-pilot scale Ayacucho 2019. The sample is water prepared from sodium arsenite, 1000 mL and 1 ppm arsenic, As^{+3} . For the quantification of arsenic, the spectrophotometric methodology was used at a wavelength of 880 nm, using a calibration graph, an equation obtained equal to $y = 0,6065x + 0,0666$; degree of correlation, R^2 equal to 0.9973. The red arsenic adsorbent clay from the water was obtained from the experimental center of the ceramic pilot plant of the National University of San Cristóbal de Huamanga, previously treated with particle size 630 to 230 μm . The response surface design type, main rotatable central composite design 2^2 , was used, the effects of 2 factors were studied in 13 executions, the design has been executed in a single block and the order of the experiments has been totally randomized that maximize the removal of arsenic above the indicated region. The optimal values of residence time of 27,73 h and amount of adsorbent of 471,197 g achieve maximum removal of arsenic with standard sample, optimal value 70,98%.

Keywords: removal of arsenic, arsenic in water, natural adsorbents.

INTRODUCCIÓN

En la presente investigación se ha evaluado la remoción de arsénico con adsorbentes naturales no metálicos, en este caso la arcilla roja proveniente de la región de Ayacucho en un reactor de lecho fijo a escala semipiloto. Son numerosas las poblaciones afectadas en todo el mundo y el arsénico es considerado por varios organismos científicos, entre ellos la International Agency for Research on Cancer (IARC), como un agente carcinogénico para humanos con base en estudios epidemiológicos que relacionan la ingestión de arsénico en el agua de bebida y cáncer en la piel y estudios ocupacionales que relacionan la exposición al arsénico y cáncer al pulmón (IARC, 2002); la remoción del arsénico de las aguas es todavía problema en el mundo, en nuestro país y en nuestra región, más aún

que existen tecnologías sin embargo aún no accesibles en nuestro país, por lo que abordar este tema de remover el arsénico de las aguas cobra un papel de gran importancia, pues además de solucionar el problema de contaminación, permite aumentar la disponibilidad del recurso hídrico exenta de este contaminante; de manera que, al proponer tecnología accesible representa una oportunidad de mejorar la calidad de agua para consumo humano, tal es así que mejor concuerda con los preceptos de un desarrollo sostenible. Es conocido desde hace años que la exposición crónica al arsénico por la ingestión de agua puede causar efectos adversos a la salud humana. Gracias a los estudios realizados en 1888 por el investigador Hutchinson se tienen los primeros antecedentes históricos que relacionaron la presencia de arsénico en el agua y lesiones en la piel como hiperpigmentación, hiperqueratosis y cáncer cutáneo (Stöhner, 1991). Los gobiernos locales en las provincias, distritos y centros poblados están obligados a garantizar el consumo de agua de sus pobladores que le brinden garantías de salubridad, más aún que muchos problemas de salud son originados por el consumo cotidiano de aguas con arsénico. Estos problemas no son ajenos a nuestra realidad, ya que se ha convertido de plano, de primordial, considerándose más aún una prioridad en el ámbito nacional e internacional.

El reactor de lecho fijo como sistema de tratamiento en la adsorción de arsénico, ofrece una buena alternativa por ser considerado eficiente, de relativos bajos costos de construcción, operación y mantenimiento. En este proyecto de investigación se optimizará las variables de control en la remoción de arsénico a escala semipiloto para encontrar las condiciones de operación más conveniente. Reportes indican que el uso de adsorbentes naturales alcanza remociones de arsénico hasta 90 %, gracias a su estructura física.

La investigación aborda la problemática de la contaminación del agua, con el propósito de evaluar la remoción de los altos niveles de arsénico con adsorbentes naturales no metálicos en un reactor de lecho fijo; el tema se encuentra dentro del área de los impactos ambientales, además como puede apreciarse es un tema que pertenece al campo del medio ambiente, en la que se va proponer una tecnología para disminuir la concentración de arsénico, la unidad de análisis han sido aguas con contenido de arsénico, sometida a la remoción de los altos niveles de arsénico con adsorbentes naturales en un reactor de lecho fijo, para de esta manera precisar si está dentro de los límites permisibles para su uso. Se persigue resolver el problema de encontrar el grado de remoción de arsénico del agua con adsorbentes naturales no metálicos en un reactor de lecho fijo a escala semipiloto así como precisar las variables de proceso: eficiencia de remoción de arsénico, la influencia del tiempo de retención, la formulación con no metálicos adsorbente natural, el caudal y si los niveles de arsénico del efluente luego de la remoción de arsénico del agua se encuentra o no dentro los estándares de calidad del agua.

Se ha tenido como objetivo general, evaluar el grado de remoción de arsénico del agua con adsorbentes naturales no metálicos en un reactor de lecho fijo a escala semipiloto Ayacucho 2019. Objetivos específicos: determinar la eficiencia de remoción de arsénico del agua; determinar el tiempo de retención adecuado en la remoción de arsénico del agua; determinar la formulación adecuada de no metálicos como adsorbente natural en la remoción de arsénico del agua; determinar el caudal adecuado en la remoción de arsénico del agua con adsorbentes naturales no metálicos; evaluar si los niveles de arsénico del efluente luego de la remoción de arsénico del agua con adsorbentes naturales no metálicos en un reactor de lecho fijo a escala semipiloto Ayacucho 2019, se encuentran dentro los estándares de calidad del agua.

MATERIAL Y MÉTODOS

Muestra

La muestra está constituida por un subconjunto de alícuotas de agua. Obtenido en el proceso de remoción de arsénico en el reactor de lecho fijo a escala semipiloto.

Diseño metodológico y diseño experimental estadístico

Para la cuantificación del arsénico se usó la metodología de espectrofotométrica a una longitud de onda de 880 nm, utilizando una gráfica de calibración como patrón, Diseño compuesto central rotatable 2² principal, se estudiaron los efectos de 2 factores en 13 ejecuciones.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El volumen de agua de tratamiento de 1000 mL y 1 ppm de arsénico, As⁺³. Procesado el programa se ha obtenido la distribución de los niveles de experimentación, donde se indica 13 ensayos, que se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Distribución de niveles de experimentación.

| Ensayo | Tiempo, h | Cantidad, g | Remoción, % |
|--------|-----------|-------------|-------------|
| 1 | 15,0 | 300,0 | 67,9 |
| 2 | 15,0 | 300,0 | 67,9 |
| 3 | 24,0 | 100,0 | 67,8 |
| 4 | 27,7 | 300,0 | 70,1 |
| 5 | 2,3 | 300,0 | 65,7 |
| 6 | 15,0 | 300,0 | 67,9 |
| 7 | 15,0 | 17,2 | 64,8 |
| 8 | 15,0 | 300,0 | 66,6 |
| 9 | 15,0 | 582,8 | 66,9 |
| 10 | 6,0 | 100,0 | 64,5 |
| 11 | 15,0 | 300,0 | 66,6 |
| 12 | 6,0 | 500,0 | 65,8 |
| 13 | 24,0 | 500,0 | 70,2 |

El error estándar de la estimación muestra la desviación normal de los residuos para ser 0,591306. El error absoluto de la media (MAE) de 0,357877 es el promedio del valor de los residuos. El estadístico Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay cualquier correlación significativa basada en el orden en el que se suceden en el fichero de datos. Puesto que el p-valor es superior a 0,05, no hay indicios de correlación de serie en los residuos.

La carta estandarizada de Pareto, figura 1, confirma los resultados del ANOVA del nivel de significancia de las variables independientes en la remoción de arsénico en muestra patrón.

Se observa que la variable independiente cantidad de adsorbente y sus interacciones sobrepasan la línea vertical de significancia en las variables dependiente, quiere decir que la cantidad de adsorbente tiene una importante influencia significativa en la remoción del arsénico en muestra patrón.

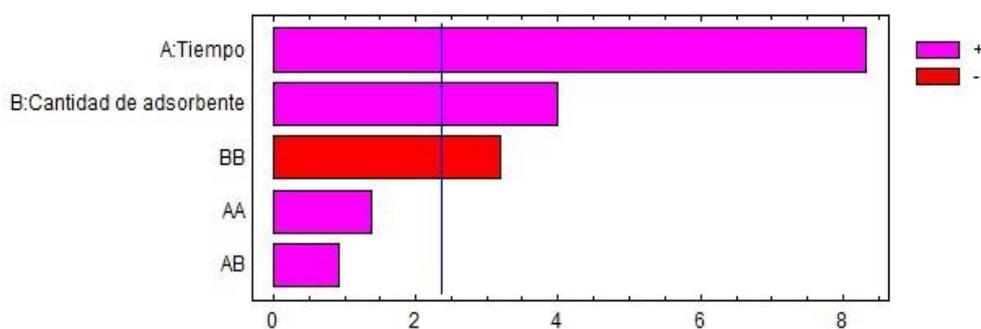


Figura 1 Carta estandarizada de Pareto para la remoción de arsénico.

En la tabla 2 detalla la repuesta optimizada para la remoción de arsénico con muestra patrón. Esta tabla muestra la combinación de niveles de factores que maximizan la remoción de arsénico por encima de la región indicada. Los valores óptimos de tiempo de residencia de 27,73 h y cantidad de adsorbente de 471,197 g logran una máxima remoción de arsénico con muestra patrón, valor óptimo 70,98 %.

Tabla 2. Respuesta optimizada para la remoción de arsénico de muestra patrón.

| Factor | Inferior | Mayor | Óptimo |
|------------------------|----------|---------|---------|
| Tiempo | 2,27 | 27,73 | 27,73 |
| Cantidad de adsorbente | 17,1573 | 582,843 | 471,197 |

La literatura (Metcalf, et al 1979; Benefield, et al 1982) recomienda llevar a cabo la prueba hasta obtener una concentración constante en el efluente, es decir, hasta la saturación completa del medio para poder estimar la

máxima capacidad de adsorción del lecho respecto al contaminante de interés en este caso el arsénico. En el estado de saturación todo el material sorbente está agotado, por lo que entre las dos fases dentro de la columna ya no procede la transferencia de arsénico, resultando en una concentración constante en el efluente de la columna. La gráfica de contornos de la figura 2 facilita la visualización del punto en el que se maximiza remoción de arsénico con muestra patrón.

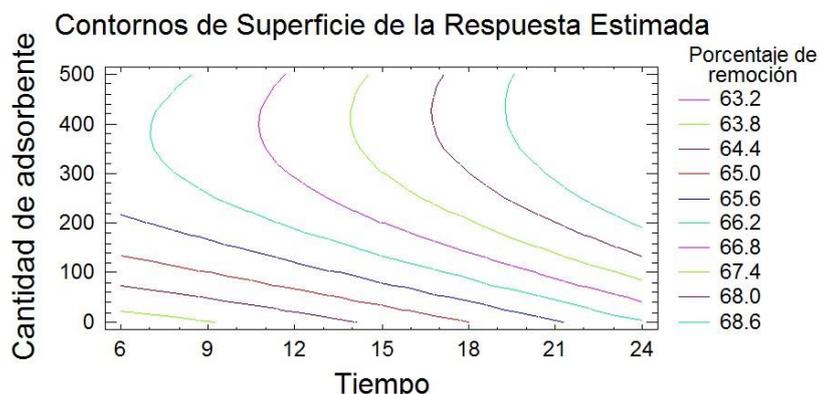


Figura 2 Gráfica de contornos para la remoción de arsénico de muestra patrón.

Los óxidos de hierro son excelentes adsorbentes de una gran variedad de especies químicas, incluyendo iones metálicos (Breeuwsma and Lyklema, 1973; Kinniburgh et al, 1975) aniones inorgánicos (Hingston, 1981) y algunos compuestos orgánicos (Tipping, 1981). La composición química de la arcilla obtenida del trabajo de investigación realizada por Y. Palomino, P. Inga, 2008, hasta presentan 0,98% de óxido de hierro.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- Acuña A., Araya A., Romero I. (2016) Selección teórica de adsorbentes potenciales naturales de bajo costo para la remoción de arsénico en el agua de consumo humano en Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 29, Número Especial Estudiantes 3. Pág. 23-34. DOI: 10.18845/tm.v.29i6.2899. <http://www.scielo.sa.cr/pdf/tem/v29s4/0379-3982-tem-29-s4-23.pdf>.
- Adauto A. (2017) Evaluación de la capacidad de adsorción de las arcillas organofílicas para la adsorción de nitratos y nitritos en soluciones acuosas. Tesis para optar el grado de Magíster en Química Pontificia Universidad Católica del Perú, Escuela de Posgrado. http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/123456789/9286/ADAUTO_ANAIS_ARCILLAS_ADSORCION.pdf?sequence=1
- Adsorption of Inorganics at Solid-Liquid Interface. Ann Arbor Science Publishers, Inc., USA
- Alfaro, A. (2007). La tierra moler o “Diatomita” como sistema de remoción de sustancias químicas en el laboratorio. *Ciencia y Tecnología*, 25: 83–96.
- Altundogan, H. S., Altundogan, S., Tümen, F. & Bildik, M. (2002). Arsenic adsorption from aqueous solutions by activated red mud. *Waste Management (New York, N.Y.)*, 22(3): 357–63.
- Alvarado A. y otros. (2009) Procesos fisicoquímicos para remoción de contaminantes en el Agua. Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Instituto Politécnico Nacional. COFAA. [https://www.repositoriodigital.ipn.mx/bitstream/123456789/8213/1/PROC ESOS%20...pdf](https://www.repositoriodigital.ipn.mx/bitstream/123456789/8213/1/PROC%20ESOS%20...pdf)
- Bocanegra O., Bocanegra E., Alvarez A., (2002) Arsénico en aguas subterráneas: y su impacto en la salud. *Groundwater and human development* ISBN 987-544-063-9. http://cofes.com.ar/descargas/info_sector/Arsenico/Bocanegra2_Alvarez_pdAs_Estudio_Bocanegra.pdf
- Breeuwsma, A. and Lyklema, J. (1973). Physical and Chemical Adsorption of Ions in the electrical Double Layer on Hematite (a-Fe₂O₃). *Jour. Colloid Interface Sci.*, 43(2), 437
- Castro de Esparza M. (1999) Remoción de arsénico a nivel domiciliario. *Analista Instrumental, CEPIS*. <http://www.bvsde.paho.org/bvsair/e/hdt/hdt74.pdf>
- Castro de Esparza M. (2016) Minimización de riesgos para la salud por metales pesados en el agua de consumo humano. Expo agua 2016. <http://www.paho.org/blogs/etras/wpcontent/uploads/2016/10/4.mlesparza.pdf>
- Castro de Esparza M., (2006) Remoción del arsénico en el agua para bebida y biorremediación de suelos. International Congress Mexico City, 20-24 June 2006, Natural Arsenic in Groundwaters of Latin America. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS-SB/SDE/OPS).
- Christine Marie C. et al. (2014) Arsenic exposure in drinking water: an unrecognized health threat in Peru *Bull World Health Organ.* 92(8): 565–572. doi:

- 10.2471/BLT.13.128496. <https://elcomercio.pe/blog/expresiongenetica/2014/09/niveles-arsenico-aguapotable>
CONAPRIS, UnIDA, ATA, 2006. Epidemiología del Hidroarsenicismo Crónico Regional Endémico en la República Argentina. Buenos Aires.
- Cortés M., Rivera H., Piña S., Martín D., Bedolla V., (1999) Evaluación de filtros intradomiciliarios, puesta en marcha de dos plantas potabilizadoras en Zimapán, Hgo. Y evaluación de riegos a la salud asociados con la exposición a arsénico., Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- De La Cruz F. (2017), Impacto ambiental potencial de metales pesados en el río apacheta por presencia de yacimientos mineros en la región Ayacucho. Tesis para optar el grado de maestro en Ciencias de la Ingeniería Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga, a la sección de posgrado.
- De Liss F. (2017) Estudio de la adsorción de arsénico presente en soluciones acuosas empleando materiales adsorbentes a base de quitosano modificado. Tesis para optar el grado académico de Magister en Química Pontificia Universidad Católica del Perú, Escuela de Posgrado.
- Dhar, R. K., Zheng, Y., Rubenstone, J. & van Green, A., 2004. A Rapid Colorimetric Method for Mesuring Arsenic Concentrations in Groundwater. *Analytica Chimica Acta*, 526(2), pp. 203-209.
- Esparza M., Wong M., (1998) Abatimiento de Arsénico en Aguas Subterráneas para zonas Rurales. XXVI Congreso interamericano de ingeniería sanitaria y ambiental.
- Flanagan, SV, Johnston RB and Zheng Y (2012). Arsenic in tube well water in Bangladesh: health and economic impacts and implications for arsenic mitigation. *Bull World Health Organ* 90:839-846.
- Graham, B. R. & Paramjit, G. S., 1999. Estimates of precision in a standard additions analysis. *Journal of chemical education*, 76(6), pp. 805-807.
- Hingston, F. (1981). A Review of Anion Adsorption. Chapter 2 en M. Anderson and A. Rubin.
- Hu, S., Lu, J. & Jing, C., 2012. A novel colorimetric method for field arsenic speciation analysis. *Journal of environmental sciences* 24(7), pp. 1341-1346.
- IARC. International Agency for Research on Cancer. Overall evaluations of carcinogenicity to humans. Disponible en: <<http://193.51.164.11/monoeval/crthgr01.html>>. Acceso en: ago. 2002.
- Iberoarsen, 2009. Metodologías Analíticas para la Determinación y Especiación de Arsénico en Aguas y Suelos, Argentina: CYTED.
- Johnson, D., 1971. Simultaneous determination of arsenate and phosphate in natural waters. *Environmental science and technology*, 5(5), pp. 411-414.
- Lenoble, V., Deluchant, V., Serpaud, B. & Bollinger, J.-C., 2003. Arsenite oxidation and arsenate determination by the molybdene blue method. *Talanta*, Volumen 61, pp. 267-276.
- Litter M. y Mansilla H. (2001) Remoción de Arsénico Asistida por Luz Solar en Comunidades Rurales de América Latina Proyecto OEA AE 141/2001. ISBN N° 987-43-6943-4
- Litter M., Fernández R., Cáceres R., Grande D., Cicerone D. y Fernández A. (2015) Tecnologías de bajo costo para el tratamiento de arsénico a pequeña y mediana escala. *AIDIS Argentina, Ingeniería Sanitaria y Ambiental*, N° 100.
- Marie C., Sima L., Jahuir H., Mihalic J, Cabrera L., Danz D., Checkley W. & Gilman R. (2018) Exposición al arsénico en el agua potable: una gran amenaza inadvertida para la salud en Perú. *Boletín de la Organización Mundial de la Salud*.
- Martinez L. y Gasquez J. (2005) Determinación de arsénico en aguas: Diferentes técnicas y metodologías. II° Seminario Hispano-Latinoamericano sobre temas actuales de hidrología subterránea; IV° Congreso Hidrogeológico Argentino. Universidad Nacional de San Luis. Argentina. http://www.produccionanimal.com.ar/agua_bebida/177-Determinacion_arsenico.pdf
- Martinez S. (2017) Evaluación sobre el uso de arcillas para la adsorción de colorantes utilizados en la industria textil. Tesis de doctorado Presentada ante la Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/59441>.
- Metcalf & Eddy (1979) *Wastewater Engineering Treatment, Disposal, Reuse*. Mc Graw Hill Book Company, pg 283-284
- Petkova V., (1999) Estudio piloto para remoción del arsénico, Estado de Hidalgo, México. *Ingeniería Hidráulica en México*, 14(3): 65-77.
- Petkova, V., Rivera, M., Piña, M., Aviles, M., Perez, S. (1998). Evaluación de diversos minerales sorbentes para la remoción de arsénico. *Ingeniería y Ciencias Ambientales*, Año 10, No. 34.
- Redacción Peru.com. (2016) Científico peruano elimina arsénico de los ríos con cáscara de coco. <https://peru.com/actualidad/mi-ciudad/peru-cientifico-peruanoelimina-arsenico-rios-cascara-coco-noticia-469719>
- Sánchez Palacios, M. A., 2015. Métodos de Calibrado, Mérida - Venezuela: Facultad de Ciencias, Departamento de Química.
- STÖHRER, G. Arsenic: opportunity for risk assessment. *Arch. Toxicol.*, Berlin, v. 65, p. 525-531, 1991.
- Tsang, S., Phu, F., Baum, M. M. & Poskrebishev, G. A., 2007. Determination of phosphate/arsenate by modified molybdenum blue method and reduction of arsenate by S₂O₄²⁻. *Talanta*, Volumen 71, pp. 1560-1568.

Fotos de la Investigación

Anexo1 Panel fotográfico



Coloración del contenido de arsénico



Determinación de la curva de calibración para cuantificar arsénico.



Reactivos de grado analítico para determinar arsénico.



Homogenización del tamaño de partícula de la arcilla roja de Ayacucho.



Control del proceso de remoción de arsénico en el reactor de lecho fijo a nivel semipiloto.