



ADSORCIÓN Y DESORCIÓN DE ARSÉNICO EN OXIHIDRÓXIDOS DE FIERRO SINTÉTICOS COMO MODELO DE ESTUDIO PARA EXPLICAR UNO DE LOS MECANISMOS DE SU LIXIVIACIÓN DE JALES MINEROS

ARSENIC ADSORPTION AND DESORPTION ON SYNTETIC IRON OXYHYDROXIDES AS STUDY MODEL TO EXPLAIN ONE OF THE MECHANISMS FOR ITS LIXIVIATION FROM MINING TAILINGS

A. de la Peña-Torres¹, I. Cano-Rodríguez^{1*}, A.F. Aguilera-Alvarado¹, Z. Gamiño-Arroyo¹, F.I. Gómez-Castro¹, M.P. Gutiérrez-Valtierra¹ y S. Soriano-Pérez²

¹Departamento de Ingeniería Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Universidad de Guanajuato, Noria Alta S/N, CP 36050, Guanajuato, Gto.

²Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de San Luis Potosí

Recibido 1 de Diciembre 2011; Aceptado 9 de Septiembre 2012

Resumen

En este trabajo se presenta un estudio sobre la cinética y la adsorción al equilibrio de arsénico sobre oxihidróxidos de hierro sintéticos y su extracción por soluciones de bicarbonatos, como un modelo para explicar que una fracción de arsénico puede lixivarse rápidamente de jales mineros por este mecanismo. La adsorción de arsénico sobre goethita y ferrihidrita sintéticas mostró una cinética de pseudo-primer orden, alcanzando el equilibrio en 6-7 días aproximadamente. Las isotermas de adsorción de arsénico sobre los oxihidróxidos sintéticos llevadas a cabo en diferentes temperaturas mostraron la misma y máxima capacidad de adsorción de 15-18 m/g, presentando un mejor ajuste al modelo de la Isoterma de Langmuir. El 95% de arsénico adsorbido sobre estos materiales fue extraído con una solución de bicarbonato de sodio 0.5 M, pH 8.5 en 2 h. Aproximadamente el 25% del arsénico total de los jales en estudio se lixivó con soluciones de bicarbonatos en 6 h. Estos resultados sugieren que en estos jales existe una fracción de arsénico unido a oxihidróxidos de hierro que puede ser lixiviada rápidamente por soluciones de bicarbonatos.

Palabras clave: arsénico, jales, adsorción-desorción, oxihidróxidos de hierro.

Abstract

This work presents a study of arsenic adsorption kinetics and equilibrium on synthetic iron oxyhydrates and its extraction by bicarbonate solutions, as a model to explain the fast way for arsenic lixiviation from mining tailings by this mechanism. The arsenic adsorption on synthetic goethite and ferrihydrite showed a pseudo-first order kinetics, reaching the equilibrium in 6-7 days. The adsorption isotherms for arsenic on synthetic goethite and ferrihydrite carried out at different temperatures levels showed the same and maximum adsorption capacity of 15-18 mg/g, presented a best fit according to Langmuir Isotherm Model; 95% of arsenic adsorbed in these materials was extracted with bicarbonate solutions 0.5 M, pH 8.5 in 2 h. Approximately 25% of total arsenic present in the mine tailings was extracted by bicarbonate solutions in 6 h. The results suggest that in these tailings, there is an arsenic fraction bound to iron oxyhydrates that can be quickly lixiviated by bicarbonate solutions.

Keywords: arsenic, mining tailings, adsorption-desorption, iron oxyhydrates.

*Autora para la correspondencia. E-mail: irene@ugto.mx
Tel: 01 (473) 73 20006 ext. 8132, 8106 (Fax)

1 Introducción

Los residuos que se generan durante las actividades mineras conocidos como “jales”, representan riesgos potenciales a la salud humana y a los ecosistemas debido a varios procesos a los que están expuestos en donde se liberan elementos potencialmente tóxicos (EPT); esto depende principalmente de las características de los mismos y de su tiempo de abandono (Fergusson, 1990, Plumlee, 1999). Durante la producción de drenaje ácido, proceso que se lleva a cabo al exponer a la intemperie los minerales provenientes de yacimientos subterráneos formados en condiciones reductoras (Moore y Luoma, 1990) se puede liberar arsénico, entre otros EPT. Simultáneamente, el arsénico liberado se puede estar adsorbiendo sobre óxidos e hidróxidos de hierro (Besoain, 1985, Taylor, 1990, Ferguson and Anderson, 1974); posteriormente bajo ciertas condiciones el arsénico puede volver a liberarse más rápidamente (Acero y col., 2006). El riesgo potencial de contaminación por arsénico presente en jales no depende de su concentración total sino de la concentración de la fracción extraíble bajo ciertas condiciones, principalmente las que pueden presentarse de manera natural, ya que esta fracción es soluble, móvil y puede transportarse por y hacia sistemas acuosos (Sengupta, 1993, Anawar y col., 2003).

En el distrito minero de Guanajuato existen aproximadamente 95 millones de toneladas de residuos mineros producto de las actividades de extracción y beneficio de minerales (Ramos-Arroyo y Siebe-Grabach 2006). Adicionalmente, Medel (2008) caracterizó y evaluó la peligrosidad de jales históricos del Distrito Minero de Guanajuato en base a su potencial de lixiviación e indica que ninguno de los EPT se lixivian con porcentajes mayores del 0.4%. En otros estudios se argumenta que algunos jales de este Distrito no presentan liberación de acidez debido a la presencia de calcita en grandes cantidades que simultáneamente lo neutraliza (Carrillo-Chávez y col. 2003, Ramos-Arroyo y col. 2004) y que la cantidad de elementos traza asociados a sulfuros disminuye conforme aumenta el tiempo de exposición de jales a la atmósfera (Ramos-Arroyo y Siebe-Grabach, 2007).

Por otra parte, algunos estudios han demostrado que la presencia de soluciones de bicarbonatos interviene en el proceso de lixiviación del arsénico de la goethita y de la ferrihidrita provocando su disolución (Van Geen y col., 1994). En este contexto, es importante determinar la cinética e isoterma de

adsorción-desorción de arsénico sobre oxihidróxidos de hierro sintéticos, como un modelo para explicar que una fracción de arsénico está unida a estos y que puede ser lixiviada de jales mineros de manera rápida por el efecto de los bicarbonatos en solución. Esta disolución a su vez explicaría las fluctuaciones súbitas e instantáneas de las concentraciones de arsénico detectadas en las corrientes de agua que interactúan con los lixiviados de jales, sobre todo en aquellos con un alto contenido de carbonatos, arsénico y minerales hierro, entre otros (Rubio-Campos y col., 2010), como en el caso de este estudio.

Por otra parte, con la finalidad de implementar acciones para el adecuado tratamiento de agua que abastece una ciudad, es importante conocer el origen, época y condiciones de las fluctuaciones de la concentración de EPT y de arsénico principalmente, dada su toxicidad.

2 Metodología

2.1 Jales del Monte de San Nicolás del Distrito Minero de Guanajuato

Las muestras de los desechos mineros fueron colectadas de los jales pasivos (de gran edad de abandono y actualmente no generadores de drenaje ácido) del Monte de San Nicolás del Distrito Minero de Guanajuato. Cabe mencionar que su ubicación, descripción del sitio, metodología para un muestreo representativo, caracterización fisicoquímica, análisis mineralógico por difracción de rayos-X y detección de As por absorción de rayos-X, entre otros, fueron previamente descritos por Rubio-Campos (2010, 2011).

2.2 Síntesis y caracterización de goethita y ferrihidrita

Con el propósito de analizar la cinética y las isoterma de adsorción y la desorción de arsénico en oxihidróxidos de hierro, la goethita se preparó de acuerdo a la metodología descrita por Reina (1996), mezclando una solución 0.6 M de sulfato de hierro con una solución de NaOH 1 M a pH 13 en agitación constante a 50 °C por seis días; al sólido formado se le agrega KOH 1 M y se le hace pasar una corriente de vapor de agua, se filtra y seca. La ferrihidrita se preparó de acuerdo a la metodología descrita por Raven (1998), mezclando una solución de Fe(NO₃)₉ H₂O con una solución de NaCl 1 M y agregando KOH

1 M lentamente y reposando por seis días a 2 °C; el sólido formado se filtra y se seca.

Las propiedades texturales de goethita y ferrihidrita sintéticas fueron determinadas por la técnica BET en un equipo ASAP 2010 a una temperatura 80 °C, para ser comparadas con las mismas muestras que contienen arsénico adsorbido.

Los materiales sintéticos también se sometieron un análisis infrarrojo (IR) y de difracción de rayos-x (DFX) en un equipo FT-IR, Perkin-Elmer, Spectrum 100, y DRX INEL modelo EQUINOX, respectivamente. Estos análisis también se realizaron en los oxihidróxidos sintéticos con arsénico adsorbido.

2.3 Determinación de la concentración de arsénico total

La concentración de arsénico total se determinó en un Espectrofotómetro de Absorción Atómica *Perkin Elmer Aanalyst 100* acoplado a un generador de hidruros (GH-EAA), a una longitud de onda 193.7 nm, apertura 0.7 nm; tiempo de integración 0.5 s con tres réplicas, previa curva de calibración de arsénico con un coeficiente de correlación mayor de 0.95.

Muestras de 10 g de jales fueron digeridas con agua regia (NO₃H y HCl 1:3) de acuerdo a la metodología de la EPA 3051 (1994) para la determinación de arsénico total; para su digestión se empleó un horno de microondas *Perkin Elmer, Multiware 3000*.

2.4 Cinética de adsorción de arsénico sobre la goethita y ferrihidrita sintéticas

A muestras de 1 g de goethita y/o ferrihidrita sintéticas se les agregó 35 ml de una solución estándar de 10.0 ppm de arsénico pH 4.5, preparada a partir de arsenito de sodio, en seis diferentes tubos de polipropileno de 60 ml, respectivamente. Los tubos se mantuvieron en un baño de agua a 25 °C en agitación constantemente para promover la interacción de la solución y el sólido, favoreciendo así la adsorción de arsénico. La adsorción se suspendió centrifugando cada uno de los tubos a diferentes tiempos, hasta 8 h; en el sobrenadante se determinó la concentración de arsénico remanente por *GH-EAA*. Cada uno de estos experimentos se realizó por triplicado y la cantidad de arsénico adsorbido se calculó por diferencias de un control en las mismas condiciones, pero sin adsorbente.

2.5 Isotermas de adsorción de arsénico, a pH 4.5 y diferentes niveles de temperatura, sobre goethita y ferrihidrita sintéticas

A muestras de 1 g de goethita y/o ferrihidrita se les adicionó 35 ml de solución estándar de arsénico pH 4.5, preparada a partir de arsenito de sodio, de diferentes concentraciones (10, 50, 100, 200 y 500 ppm) en cinco diferentes tubos de polipropileno de 50 ml, respectivamente. Los tubos se mantuvieron en un baño de agua a 25 °C en agitación constantemente por 24 h para garantizar el equilibrio. Al cabo de este tiempo, la adsorción se suspendió centrifugando cada uno de los tubos; en el sobrenadante se determinó la concentración de arsénico remanente por *GH-EAA*. Este procedimiento se repitió para 30 y 40 °C. Cada uno de estos experimentos se realizó por triplicado y la cantidad de arsénico adsorbido se calculó por diferencias de un control en las mismas condiciones, pero sin adsorbente.

2.6 Efecto de bicarbonatos en la lixiviación de arsénico de goethita, ferrihidrita y de jales mineros

Muestras de 1 g de goethita y ferrihidrita con arsénico adsorbido, así como 1 g de jales del Monte de San Nicolás del Distrito Minero de Guanajuato, se pusieron en contacto con 25 ml de una solución de bicarbonato de sodio 0.5 M, pH 8.5 en agitación constante, y temperatura ambiente. La muestra de jales también se puso en contacto con una solución de bicarbonato de sodio 1 M, pH 10.5. A diversos tiempos, la desorción fue interrumpida por centrifugación y el arsénico fue determinado en solución por *GH-EAA*.

3 Resultados y discusión

3.1 Jales del Monte de San Nicolás del Distrito Minero de Guanajuato

En cuanto a la caracterización de los jales en estudio, en un trabajo preliminar Rubio-Campos (2010, 2011) reportó una variación temporal y espacial de la presencia de elementos potencialmente tóxicos (EPT) como Zn, Cd, Pb, Mn y As; en estos mismos trabajos también se reportó que en estos jales se detectó la presencia de arsénico en sus dos principales estados de oxidación (III y V) por estudios de absorción

de rayos-X (en el Stanford Synchrotron Radiation Laboratory (SSRL) en Menlo Park, CA.), así como su alta capacidad de neutralización por su gran contenido de carbonatos y la consecuente generación de bicarbonatos en solución en épocas de lluvia o intensa humedad, condiciones en las que la lixiviación de arsénico puede presentarse de manera rápida, y otras características.

3.2 Caracterización de goethita y ferrihidrita, con y sin arsénico adsorbido

Las características texturales obtenidas por el método BET para la goethita y ferrihidrita con y sin arsénico adsorbido se presentan en la Tabla 1.

En esta tabla se observa que el área superficial, el volumen de poro, y el diámetro de poro, son mayores sin la presencia de arsénico, ya que cuando el arsénico está adsorbido sobre los materiales ocupa una fracción de volumen. Estas diferencias son más marcadas para el caso de la ferrihidrita.

Cabe mencionar que en los espectros IR y DFX se presentan características amorfas de los oxihidróxidos

sintéticos, sin variaciones observables por la presencia de arsénico (datos no mostrados).

3.3 Cinética de adsorción de arsénico sobre goethita y ferrihidrita

En la Fig. 1 se muestra las cinéticas de adsorción de arsénico sobre goethita (a) y ferrihidrita (b), respectivamente.

En esta figura se observa que en un tiempo aproximado de 6-7 h se alcanza un equilibrio de adsorción de arsénico y que en este punto la adsorción es de 0.04-0.06 mg/g.

Los valores de las cinéticas de adsorción de arsénico presentaron un mejor ajuste al modelo de pseudo-primero orden representado en la ecuación (1), como se muestra en la Fig. 2 (a) y (b) para la goethita y ferrihidrita, respectivamente.

$$\log(C_e - C_t) = \log C_e - \frac{k}{2.303} t \quad (1)$$

Cabe señalar que para los estudios de adsorción se utilizó una sal de arsénico(III) ya que como se mencionó anteriormente, esta especie está presente en los jales en estudio (Rubio-Campos y col., 2010).

Tabla 1. Características texturales de goethita y ferrihidrita sintéticas, con y sin arsénico adsorbido.

| Oxihidróxidos de Fe | Área superficial (m ² /g) | Volumen de poro (cm ³ /g) | Diámetro de poro (nm) |
|---------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------|
| Goethita | 50.60 | 1.5 × 10 ⁻³ | 1.483 |
| Goethita con arsénico | 35.59 | 8.3 × 10 ⁻⁴ | 1.376 |
| Ferrihidrita | 54.30 | 1.2 × 10 ⁻³ | 1.876 |
| Ferrihidrita con arsénico | 9.96 | 3.9 × 10 ⁻⁴ | 0.7921 |

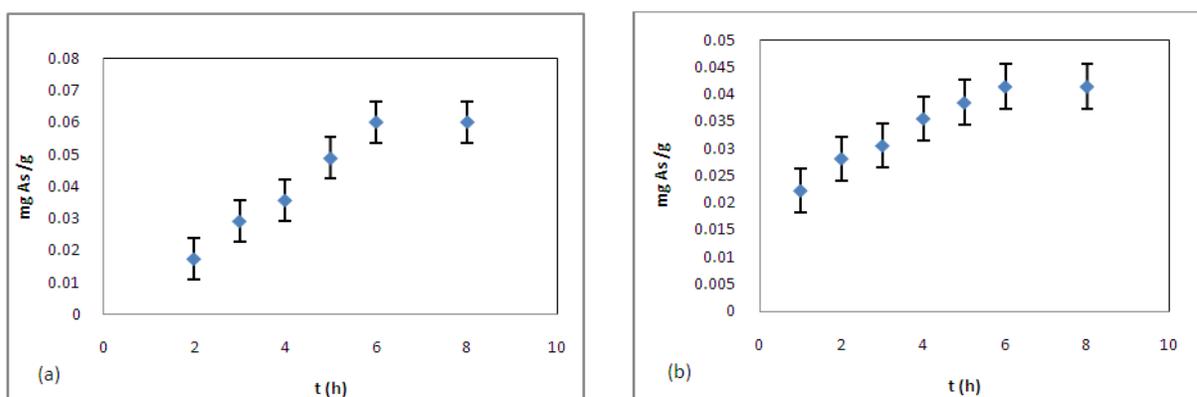


Fig. 1. Cinética de adsorción de arsénico 10.0 ppm, pH 4.5, 25 °C sobre goethita (a) y ferrihidrita (b) sintéticas. Las barras de error representan intervalos de confianza al 95%.

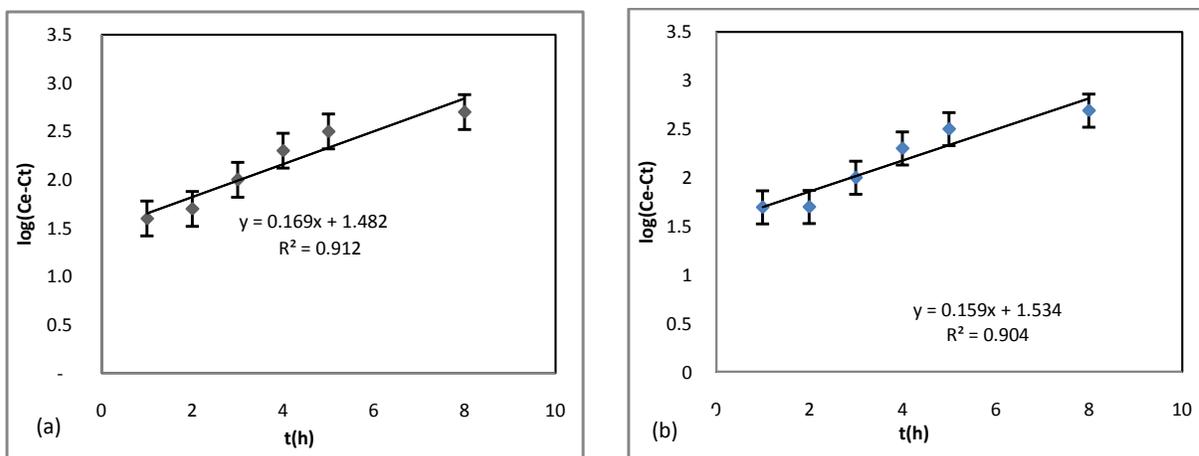


Fig. 2. Ajuste de la cinética de adsorción de arsénico 10.0 ppm, pH 4.5, 25 °C, sobre goethita (a) y ferrihidrita (b) sintéticas, al modelo cinético de pseudo-primer orden. Las barras de error representan intervalos de confianza al 95%.

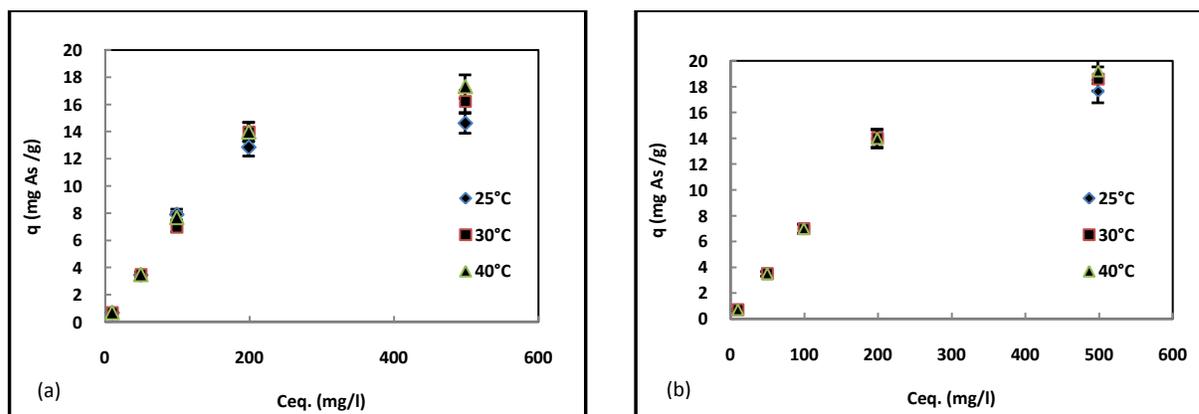


Fig. 3. Isotermas de adsorción de arsénico pH 4.5, a diferentes concentraciones y niveles de temperatura sobre goethita (a) y ferrihidrita (b) sintéticas. Las barras de error representan intervalos de confianza al 95%.

3.4 Isotermas de adsorción de arsénico sobre goethita y ferrihidrita, a diferentes niveles de temperatura

En la Fig. 3 se muestran las isotermas de adsorción de arsénico sobre goethita (a) y ferrihidrita (b), a diferentes niveles de temperatura.

En esta figura se puede observar que la capacidad de adsorción de arsénico no depende de la temperatura, ya que el perfil de concentración es prácticamente el mismo en las diferentes niveles de temperaturas ensayadas y que la máxima adsorción de arsénico en los materiales sintéticos es de 15-18 mg/g.

Es importante mencionar que el pH al final de los experimentos de adsorción de arsénico sobre ferrihidrita y goethita presentó una variación de pH 4.5 a pH 8.1. Esta variación de pH sugiere que el mecanismo de adsorción del arsénico puede estar llevándose a cabo mediante un intercambio iónico del grupo OH por AsO_3^{-3} . Estos resultados están acordes con otro reporte en donde se determina que el proceso de adsorción de arsénico sobre oxihidróxidos de hierro, los aniones de arsenato o arsenito pueden desplazar al grupo hidroxilo, ocupando su lugar y que la carga y tamaño de iones son factores que determina la adsorción por intercambio iónico (Sparks, 1989).

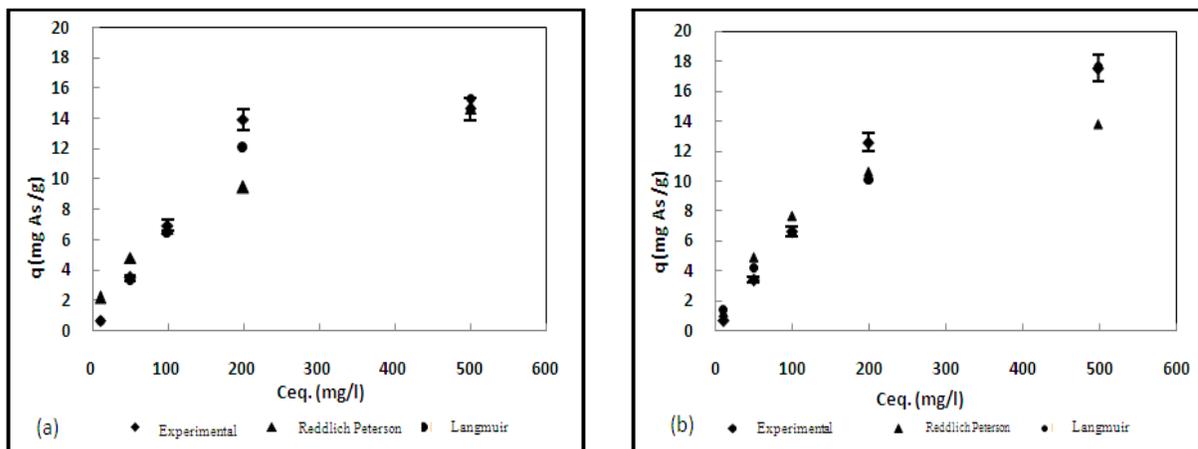


Fig. 4. Isothermas de adsorción de arsénico, experimental y teóricas, pH 4.5 y 25 °C sobre goethita (a) y ferrihidrita (b) sintéticas. Las barras de error representan intervalos de confianza al 95%.

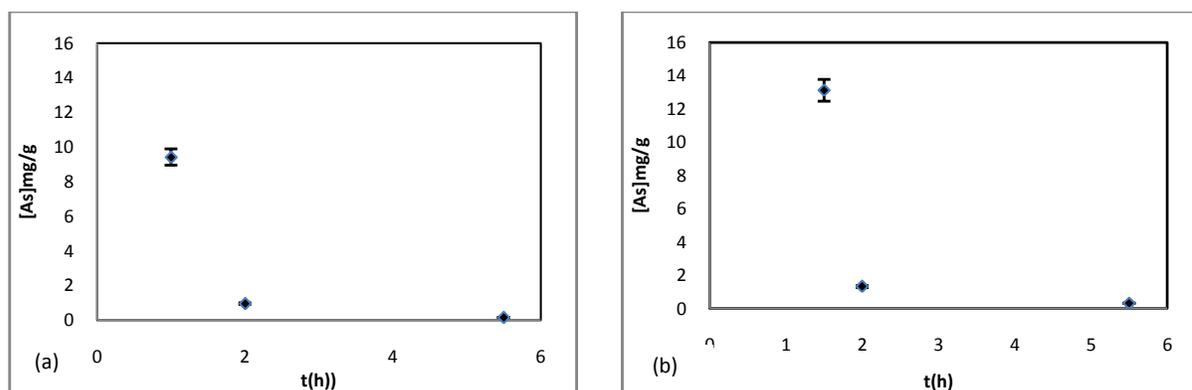


Fig. 5. Desorción de arsénico de goethita (a) y de ferrihidrita (b) sintéticas en presencia de bicarbonato sodio 0.5 M, pH 8.5. Las barras de error representan intervalos de confianza al 95%.

3.5 Ajuste de las isothermas de adsorción de arsénico sobre goethita y ferrihidrita a modelos de adsorción convencionales

En la Fig. 4 se muestra el comportamiento de las isothermas de adsorción de arsénico sobre goethita (a) y ferrihidrita (b) con relación a los modelos convencionales de Langmuir y Redlich Peterson, entre otros.

Es importante mencionar que la adsorción de arsénico sobre goethita y ferrihidrita, presentaron un mejor ajuste al modelo de la isoterma de Langmuir con 96% de correlación para ambos materiales, coincidiendo la máxima capacidad de adsorción teórica con la experimental. Otros modelos de isothermas de adsorción probados presentaron muy

bajas correlaciones de ajustes (datos no mostrados).

3.6 Efecto de bicarbonatos en la desorción de arsénico de goethita y ferrihidrita

En la Fig. 5 se puede observar el comportamiento de la desorción de arsénico de la goethita (a) y ferrihidrita (b) por efecto de soluciones de bicarbonato, respectivamente.

En esta figura se puede observar que para ambos casos, en 2 h el 95% del arsénico adsorbido logró extraerse con la solución de bicarbonato. Esta extracción de arsénico puede estar llevándose a cabo porque el ion HCO_3^- desplaza por su acidez al ion arsenato/arsenito liberándolo en la solución (Kim y col. 2000).

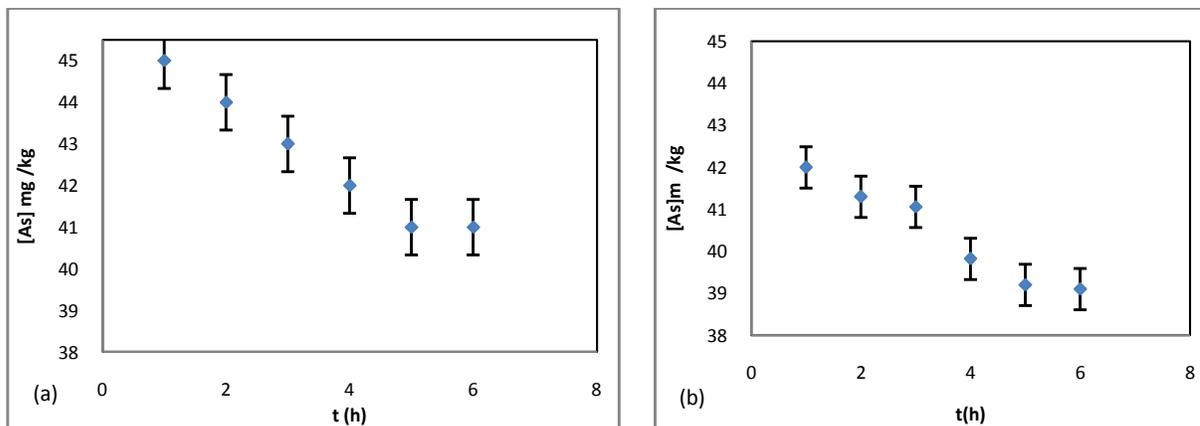


Fig. 6. Lixiviación de arsénico de jales mineros con carbonato de sodio 1 M, pH 10.5 (a) y con bicarbonato de sodio 0.5 M, pH 8.5 (b). Las barras de error representan intervalos de confianza al 95%.

3.7 Efecto de bicarbonatos en la lixiviación de arsénico de jales mineros

La lixiviación de arsénico de jales mineros con bicarbonato de sodio a diferentes concentraciones se realizó con el propósito de detectar alguna dependencia en rangos de concentración de bicarbonatos presentes de manera natural en los jales en estudio (Rubio-Campos, 2010). En la Fig. 6 se muestra la lixiviación de arsénico con una solución de bicarbonato de sodio 1.0 M, pH 10.5 (a) y 0.5 M, pH 8.5 (b).

En esta figura se observa una máxima lixiviación de arsénico de jales de 14-17 mg/g en aproximadamente 6 h con las dos concentraciones probadas, aunque a tiempos tempranos se detectó mayor lixiviación a mayor concentración de solución de bicarbonato.

Estos resultados muestran que el arsénico presente en los jales en estudio puede extraerse en aproximadamente 25-30% con soluciones de bicarbonato, ya que el arsénico total en los mismos jales se detectó en aproximadamente 56 mg/kg. Esto puede deberse al mismo mecanismo descrito para la adsorción-desorción de arsénico sobre oxihidróxidos de hierro presentes en los jales por el efecto de carbonatos (Anawar y col., 2004).

Estos resultados sugieren que una fracción de aproximadamente 25% del arsénico total en los jales pasivos del Monte de San Nicolás del Distrito Minero de Guanajuato, se encuentra adsorbida sobre los oxihidróxidos de hierro presentes en los mismos jales; y dada también la presencia de bicarbonatos, sobre todo en épocas de lluvia o de intensa humedad, se

promueve su lixiviación y por lo tanto su movilidad hacia sistemas acuosos. Esto podría explicar las fluctuaciones de la concentración de arsénico en diversos reservorios de agua que interaccionan con los lixiviados de jales, ya que Rubio-Campos (2011) reportó que en estas condiciones se detectó aproximadamente 0.04 ppm, lo que representa casi el doble de la concentración de arsénico permitida en agua potable que es de 0.025 ppm (NOM-127-SSA1-1994).

Conclusiones

La ferrihidrita y la goethita sintéticas presentan micro poros y su área superficial, volumen y diámetro promedio disminuyen con arsénico adsorbido.

La adsorción del arsénico sobre goethita y ferrihidrita se rigen por una cinética de pseudo-primer orden, no depende de la temperatura y puede desorberse rápidamente por efecto de bicarbonatos.

El incremento de pH al final de los experimentos de adsorción de arsénico sobre los materiales sintéticos indica que dichos procesos pueden estar llevándose a cabo por un mecanismo de intercambio iónico donde el anión arsenito, o arsenato, puede desplazar al grupo hidroxilo de la goethita y ferrihidrita, que a su vez pueden ser desplazados por iones bicarbonato.

Las muestras de jales de la mina de San Nicolás del Distrito Minero de Guanajuato contienen aproximadamente 56 mg/kg de arsénico total y la presencia de soluciones de bicarbonato, que puede generarse de manera natural dado su gran

contenido de carbonatos, lograron lixiviarlo en 25% aproximadamente; por lo que esta fracción de arsénico en los jales en estudio es susceptible de moverse e incorporarse rápidamente a sistemas acuosos, provocando un riesgo potencial a la salud, ya que la concentración de arsénico puede superar los límites permisibles en agua potable establecidos en la normatividad vigente.

3.8 Agradecimientos

Los autores agradecen a SEP-PROMEP por el apoyo recibido a través del proyecto de Redes Temáticas de Colaboración de Cuerpos Académicos 2009-2011 y al CONACyT por el apoyo a los estudiantes becarios.

Referencias

- Acero, P., Ayora, C., Torrento, C. y Nieto, J.M. (2006). The behavior of trace elements during schwertmannite precipitation and subsequent transformation into goethite and jerosite. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 70, 4130-4139.
- Anawar, H.M., Akai, J. y Sakugawa, H. (2004). Mobilization of arsenic from subsurface sediments by effect of bicarbonate ions in groundwater. *Chemosphere* 54, 753-762.
- Besoain, E. (1985). *Minerales de arcilla de suelos*. Editorial IICA/Serie de Libros y Materiales Educativos No 60, San José, Costa Rica, pp. 643-671.
- Carrillo-Chávez, A., Morton-Bermea, O., González-Partida, E., Rivas-Solorzano, H., Oesler, G., García-Meza, V. Hernández, E., Morales, P. y Cienfuegos, E. (2003). Environmental Geochemistry of the Guanajuato Mining District, Mexico. *Ore Geology Reviews* 23, 277-297.
- DOF 2000, Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994. *Salud Ambiental, agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamiento a que debe someterse el agua para su potabilización*, Secretaría de Salud, México, D.F., México.
- Ferguson, J.F. y Anderson, M.A. (1974). Chemical forms of arsenic in water supplies and their removal. In: *Chemistry of Water Supply, Treatment and Distribution* (Rubin A. J. Ed.), Ann Arbor Science, MI, U.S., pp. 137-158.
- Fergusson, J. E. (1990). The heavy elements. In: *Chemistry, environmental impact, and health effects*. Pergamon Press, Oxford, U.S.
- Kim, M.J., Nriagu, J. y Haack, S. (2000). Carbonate ions and arsenic dissolutions by groundwater. *Environmental Science and Technology* 34, 3094-3100.
- Medel, A., Ramos, S., Avelar, F. J., Godínez, L. A. y Rodríguez, F. (2008). Caracterización de Jales Mineros y evaluación de su peligrosidad con base en su potencial de lixiviación. *Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal* 35, 33-35.
- Moore, J.N. y Luoma, S.N. (1990). Hazardous wastes from large-scale metal extraction. A case study. *Environmental Science and Technology* 24, 1278-1285.
- Plumlee, G.S. (1999). The environmental geology of mineral deposits. In: *The Environmental Geochemistry of Mineral Deposits Part A: Processes, Techniques and Health Issues*. (Plumlee, G. S., and Logsdon, M. J., Eds.), Pp. 71-116, Reviews in Economy Geology, Vol. 6B: Littleton, CO, Soc. Econ. Geologists, Nueva York, U.S.
- Ramos-Arroyo, Y. R., Prol-Iedesma, R.M., y Siebe-Grabach, C., (2004). Características geológicas y mineralógicas e historia de extracción del Distrito de Guanajuato, México. Posibles Escenarios geoquímicos para los residuos mineros. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 21, 268-284.
- Ramos-Arroyo, Y. R. y Siebe-Grabach, C. D. (2006), Estrategia para identificar jales con potencial de riesgo ambiental en un distrito minero: estudio del caso en el Distrito de Guanajuato, México. *Revista Mexicana en Ciencias Geológicas* 23, 54-74.
- Ramos-Arroyo, Y. R. y Siebe, C. (2007). Weathering and sulphide minerals and trace element speciation in tailings of various ages in the Guanajuato mining district, Mexico. *Catena* 71, 497-506.

- Raven K. P., Amita, J. y Loeppert, R. H. (1998). Arsenite and Arsenate Adsorption on Ferrihydrite: Kinetics, Equilibrium and Adsorption Envelopes. *Environmental Science and Technology* 32, 344-349.
- Reina Correa J.R., Canetti de la Cuevas D. y Álvarez Alvelaiz N. (1996). Características térmico-estructurales de goethitas desordenadas y sus propiedades eléctricas determinadas por espectroscopia de impedancias. *Revista Mexicana de Física* 42, 1001-1013.
- Rubio-Campos, B. E., I. Cano-Aguilera, A. F. Aguilera-Alvarado, G. de la Rosa y S. Soriano-Pérez (2010). Factors controlling the release of arsenic from mining tailings, In: *Environmental Toxicology III*, V. Popov and C.A. Brebbia, Wessex Institute of Technology, Transactions on Ecology and the Environment, UK, 55-66.
- Rubio-Campos, B.E. (2011). Tesis Doctoral en Ciencias en Ingeniería Química, Departamento de Ingeniería Química, *Universidad de Guanajuato*, Guanajuato, Gto., México.
- Sengupta, M. (1993). Environmental impacts of mining. *Monitoring, restoration and control*. Lewis Publishers, Boca Raton, FL., U.S., pp. 156-157
- Sparks, D.L (1989). *Kinetics of Soil Chemical Processes*. Academic Press, New York, U.S., pp 154-161.
- Taylor, R. (1991) Some observations on the formation and transformation of iron oxides In: *Soil colloids and their Associations in Aggregates*, (De Boot, M.F., Hayes, M, and Herbillon, A. (Eds.), Plenum Publ., New York, U.S., pp. 85-103.
- USEPA Method 3051 (1994). *Microwave Assisted Acid Digestion of Sediments, Sludges, Soils, and Oils*, U.S.
- Van Geen A., Robertson, A.P. y Leckei, J.O. (1994). Complexation of carbonate species at the goethite surface: Implications for adsorption of metal ions in natural waters. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 58, 2073-2086.