Eliminación de arsénico mediante flotación por adsorción coloidal utilizando flóculos de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ en un sistema de flotación por aire disuelto^(*)

O. Pavez*, J. M. Palacios*, C. Aguilar^{2**}

Resumen

En el presente trabajo se estudió el efecto de la relación Fe/As sobre la eliminación de arsénico aplicando flotación por adsorción coloidal en aguas con distintos contenidos de arsénico. Como coagulante se utilizó cloruro férrico y dodecil sulfato de sodio como colector, y las soluciones fueron preparadas con trióxido de arsénico. Los resultados obtenidos muestran que el rango de pH 4-5,5 es el más adecuado para la eliminación de arsénico, aumentando el porcentaje de eliminación con el incremento de la concentración inicial de Fe(III) en la solución. Por otra parte, a medida que disminuye la concentración inicial de arsénico en la solución se requiere una mayor proporción de Fe/As para su eliminación. Además, se mostró que para soluciones conteniendo 13,73 mg/l, 1,71 mg/l y 0,105 mg/l de As, se necesitan relaciones Fe/As de 6:1, 18:1 y 800:1 para lograr una eliminación de arsénico desde la solución del orden de 95 %.

Palabras clave

Arsénico; Eliminación; Flotación por aire disuelto; Relación Fe/As.

Arsenic removal by using colloidal adsorption flotation utilizing $\text{Fe}(\text{OH})_3$ floc in a dissolved air flotation system

Abstract

In the present work, the influence of Fe/As ratio on the As removal, from aqueous solutions, applying flotation by colloidal adsorption was studied. Ferric chloride was used as coagulant and dodecil sulfate as collector, and arsenic trioxide was utilized to preparing the solutions. The obtained results show that the highest arsenic removal was accomplished in the range of pH between 4 and 5,5, and the increasing of the initial concentration of Fe(III), increases the removal of arsenic from the solution. However, with the decreasing of the initial concentration of arsenic in the solution, it is required a larger Fe/As ratio for its removal. For solutions containing: 13,73, 1,71 and 0,105 mg/L of arsenic, it was shown that to remove around 95% of the dissolved arsenic, a Fe/As ratios of approximately 6/1, 18/1 and 800/1, respectively, are required.

Keywords

Arsenic; Removal; Dissolved air flotation; Fe/As ratio.

1. INTRODUCCIÓN

El arsénico es un elemento que forma parte de la corteza terrestre y se encuentra diseminado en pequeñas cantidades en la naturaleza. Su presencia en el agua puede ocurrir por disolución natural de pequeños depósitos geológicos, la descarga de efluentes industriales y la sedimentación de material particulado. Altos niveles de arsénico en agua para beber han sido encontrados en varios países [1 y 2].

La toxicidad por arsénico puede ocurrir en forma aguda y crónica, dependiendo del tiempo y de la cantidad ingerida. Los síntomas más comunes son las lesiones dérmicas observadas después de una exposición de alrededor de 5 años. También se ha publicado el incremento de mortalidad de cáncer al hígado, riñón y pulmón [3 y 4].

Varios métodos para la eliminación de arsénico han sido descritos en la literatura, entre los que se cuentan: adsorción en alúmina activada y con carbón activado [5-8],

^(*) Trabajo recibido el día 4 de abril de 2008 y aceptado en su forma final el día 19 de octubre de 2008.

* Departamento de Metalurgia, Universidad de Atacama, Avenida Copayapu 485, Copiapó, Chile. E-mail: osvaldo.pavez@uda.cl

** Instituto de Materiales y Procesos Termomecánicos, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Universidad Austral de Chile, General Lagos 2086, Valdivia, Chile. E-mail: ceaguilar@uach.cl.

utilización de resinas de intercambio iónico^[5 y 7-9], co-precipitación con hierro^[5 y 10-14], separación con membranas^[5, 12 y 15], adsorción en zeolitas^[16 y 17] y flotación por adsorción coloidal^[18-24].

El último método mencionado utiliza hidróxido férrico coloidal como floculo transportador para la eliminación del arsénico, y oleato de sodio, dodecil sulfato de sodio (SDS) y aminas, como colectores. Comúnmente, se considera que el $\text{Fe}(\text{OH})_3$ y el SDS son los reactivos más efectivos como floculo transportador y colector, respectivamente^[22].

El mecanismo de interacción entre los floculos de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ transportando arsénico y dodecil sulfato de sodio ha sido interpretado mediante medidas de potencial zeta, análisis de espectro infrarrojo y teoría orbital molecular^[23]. Xiaoyuan *et al.*^[22] estudiaron, mediante difracción de rayos X, la estructura de la co-precipitación de $\text{Fe}(\text{III})$ y $\text{As}(\text{V})$ desde soluciones a pH 4,2. Los resultados obtenidos indicaron que este co-precipitado consta de dos componentes: $\text{Fe}(\text{OH})_3$ y $\text{Na}_3\text{Fe}_{1,77}\text{H}_{0,69}(\text{AsO}_4)_3 \cdot 0,8\text{H}_2\text{O}$. En el proceso de flotación por adsorción coloidal de arsénico, la sustancia sólida colectada por el surfactante es el floculo de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ transportando $\text{Na}_3\text{Fe}_{1,77}\text{H}_{0,69}(\text{AsO}_4)_3 \cdot 0,8\text{H}_2\text{O}$.

La estabilidad y solubilidad de los compuestos formados en este proceso es un tema en discusión; sin embargo, actualmente es aceptada la precipitación de arsénico como un arsenato férrico básico, $\text{FeAsO}_4 \cdot \text{Fe}(\text{OH})_3$, formado por co-precipitación con el ión férrico, mientras que el arsenato férrico simple, FeAsO_4 , formado con una razón molar 1:1, es relativamente soluble a pH neutro. El arsenato férrico básico con razones molares de tres o más, es estable en un amplio rango de pH^[25-27]. Las características de compuestos férricos, lantánicos y compuestos de arsenato férrico-lantánico, formados a temperatura ambiente en pH ácido y alcalino, fueron investigadas por Nanor *et al.*^[28] mediante estudios de potencial zeta, difracción de rayos X (DRX) y con microscopía de barrido electrónico (MEB).

De Carlo and Zeitlin^[19] y De Carlo and Thomas^[21], aplicando flotación por adsorción coloidal y usando lauril sulfato de sodio como colector, encontraron que la eliminación de arsénico es máxima en el rango de pH 4 - 5,5, lo que concuerda con el rango óptimo de pH, 4 - 4,8, obtenido por Xiaoyuan *et al.*^[22] empleando dodecil sulfato de sodio como colector en flotación por adsorción coloidal. Ambos trabajos, coinciden que el mecanismo de la adsorción del colector en la superficie de los floculos de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ que transportan el $\text{As}(\text{V})$, parece ser de carácter electrostático. Sin embargo, el análisis del espectro infrarrojo realizado por Xiaoyuan *et al.*^[22] mostró que la adsorción del dodecil sulfato de sodio en la superficie del $\text{Fe}(\text{OH})_3$ es un proceso químico, lo cual fue explicado mediante la

teoría orbital molecular moderna. En un estudio mas reciente, Zhao *et al.*^[24] encontraron que el rango de pH 3,5 - 5,5 es el más adecuado para la eliminación de arsénico cuando se aplica flotación por adsorción coloidal con hidróxido férrico como co-precipitante y dodecil sulfato de sodio como colector.

La relación inicial de Fe/As en la solución está muy relacionada con la concentración inicial de arsénico para obtener una alta eliminación de éste mediante flotación por adsorción coloidal. Así, Zhao *et al.*^[24] trabajando con soluciones de 15,41 mg/l de arsénico encontraron que se requería una relación Fe/As de 6:1 para alcanzar una alta eliminación de arsénico, por otra parte, en estudios desarrollados por Nakashima^[18] se observa que para eliminar arsénico desde una solución de 0,001 mg/l de arsénico, se necesita una relación Fe/As del orden de 5000:1.

Sin embargo, no hay mucha información para contenidos de arsénico en el rango intermedio, por lo tanto, en el presente trabajo se estudia el efecto de la relación Fe/As sobre la eliminación de arsénico, desde soluciones que contienen concentraciones iniciales de 13,73 mg/l, 1,71 mg/l y 0,105 mg/l de arsénico, mediante flotación por adsorción coloidal, y utilizando una unidad de laboratorio de flotación por aire disuelto (FAD).

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En los experimentos de flotación se utilizó dodecil sulfato de sodio, $\text{C}_{12}\text{H}_{25}\text{NaO}_4\text{S}$, p.a. pureza > 98 %, de Fukla, como colector, y cloruro férrico, $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, p.a. pureza > 95 % (Fluka) como coagulante. En la preparación de las soluciones se utilizó trióxido de arsénico, As_2O_3 , p.a. pureza > 99 %, de Fluka, y agua desionizada. Hidróxido de sodio, NaOH , y ácido clorídrico, HCl , ambos de pureza analítica, fueron usados en el control de pH. Los ensayos de sedimentación fueron realizados en vasos de precipitados de 400 ml, en los que se adicionó la solución conteniendo arsénico y el coagulante (cloruro férrico). El pH fue ajustado a un valor determinado y luego la solución fue agitada, dejándose posteriormente en reposo para que se produjera la sedimentación. Finalmente, se tomaron muestras de líquido clarificado para los análisis químicos.

En el proceso de flotación por aire disuelto se formaron microburbujas, con diámetros en el rango 0,01 - 0,1 mm, mediante la reducción de presión del agua saturada con aire a alta presión. La unidad de laboratorio de flotación por aire disuelto estaba compuesta por una celda de flotación de 1 l conectada a un saturador de acero, recubierto internamente por pintura epóxica, de dos litros de capacidad, tal como se

muestra en la figura 1. El saturador y la celda de flotación están conectados entre sí por medio de una válvula. La presión de saturación se alcanza por la inyección de aire a presión a través de una placa porosa dentro del líquido. La celda posee dos orificios próximos a la base, uno de los cuales se utilizaba como conexión al saturador, mientras que, el otro permite la remoción del agua clarificada. El pH de la solución se controla mediante un pH-metro digital.

Los ensayos de flotación por aire disuelto se realizaron de acuerdo al procedimiento que se indica. Se satura el agua con aire comprimido a una presión constante de 6 atm durante 15 min. Una solución de arsénico de 500 ml, previamente acondicionada con cloruro férrico, se introduce a la celda de flotación y se ajusta el pH. Posteriormente, se adiciona el colector y se ajusta nuevamente el pH, acondicionándose mediante agitación magnética. A continuación se inyectan 200 ml de agua saturada, a la presión de saturación, en la celda de flotación, flotándose durante 1 min. Finalmente, se toma una muestra para análisis químico desde la celda de flotación.

La determinación de arsénico total en agua se realiza por absorción atómica con generación de hidruro. El método se basa en la determinación de arsénico en una muestra previamente sometida a digestión ácida, por generación de su hidruro mediante la reacción con borohidruro de sodio y la cuantificación mediante espectrofotometría de absorción atómica.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Ensayos de sedimentación

En la figura 2 se muestra el efecto del pH sobre la concentración de arsénico en los ensayos de sedimentación con soluciones de 3,91 mg/l As y una relación $\text{Fe}/\text{As} = 10$. En esta figura se puede observar que es posible alcanzar una baja concentración final de arsénico a valores de pH en el rango 5 - 9. Además, se puede apreciar que para valores de pH 3 y 4 la concentración final de arsénico en la solución es alta.

Figura 1. Unidad de laboratorio de flotación por aire disuelto.

Figure 1. Unit of laboratory of flotation by dissolved air.

Figura 2. Efecto del pH sobre la concentración final de As en ensayos de sedimentación. Concentración inicial de arsénico = 3,91 mg/l.

Figure 2. Effect of pH on final concentration of As in sedimentation test. Initial As concentration, 3,91 mg/l.

Para valores de $\text{pH} \geq 5$, la baja concentración de arsénico que se observa en la solución clarificada indica una alta sedimentación de los flóculos de hierro que contienen el arsénico adsorbido. Sin embargo, para $\text{pH} < 5$, la sedimentación de arsénico disminuye notoriamente a medida que baja el pH, sugiriendo que en esos valores de pH la precipitación de hidróxido férrico es insuficiente, lo que está de acuerdo con lo publicado por De Carlo and Zeitlin^[19], quienes señalaron que la disminución en la recuperación de elementos trazas (Ge, As, Sb, Se) para valores de pH bajo 4, se atribuía principalmente a la ausencia de suficiente $\text{Fe}(\text{OH})_3$ coloidal para colectar los aniones y Chatmann *et al.*^[31] ya habían señalado que las consideraciones de co-precipitación pueden ser tan importantes como las atracciones electrostáticas en la eliminación de elementos trazas desde soluciones.

3.2. Ensayos de flotación por aire disuelto

El efecto del pH en la eliminación de arsénico utilizando dodecil sulfato de sodio como colector se presenta en la figura 3 y, en esta figura, se observa que los mejores resultados fueron obtenidos en el rango de pH 4 - 5,5, apreciándose una disminución en la eliminación de arsénico, para valores de pH fuera del

Figura 3. Efecto del pH en la eliminación de arsénico en ensayos de flotación por aire disuelto. Concentración inicial de As = 13,73 mg/l; Relación Fe/As = 10; Concentración de dodecil sulfato de sodio = 40 mg/l.

Figure 3. Effect of pH on removal of As in flotation test by dissolved air. Initial As concentration, 12,73 mg/l; Fe/As ratio 10, concentration of dodecil sulfate of sodium 40 mg/l.

rango señalado. Estos resultados muestran que en este rango de pH se alcanza la mayor eliminación de arsénico desde la solución, lo que concuerda plenamente con los resultados publicados en la literatura^[19, 21 y 24].

Esto se puede explicar por el comportamiento del hidróxido de hierro, que tiene carga positiva en una solución ácida y adsorbe aniones, mientras que en una solución básica, el hidróxido de hierro tiene carga negativa y adsorbe cationes^[20]. El punto de carga cero del $\text{Fe}(\text{OH})_3$ en solución acuosa se encuentra en el rango de pH entre 6,0 y 8,5^[29 y 30]. De Carlo and Thomas^[21] señalan en los estudios que realizaron, el uso de lauril sulfato de sodio, debido a la carga positiva de la superficie residual en el precipitado de hidróxido de hierro, para valores bajos de pH en la flotación y para valores de pH sobre 6,5, la carga superficial de los floculos es negativa, por lo cual se requiere el uso de lauril cloruro de amonio, un surfactante catiónico.

En la figura 4 se muestra el efecto de la concentración de hierro en la eliminación de arsénico desde una solución con una concentración inicial de 13,73 mg/l As. Se observa en esta figura que la eliminación de arsénico aumenta con el incremento de la concentración de hierro. Resultados muy similares al aplicar flotación por adsorción coloidal fueron

Figura 4. Eliminación de arsénico en función de la concentración de Fe en ensayos de flotación. Concentración inicial de As = 13,73 mg/l; pH = 5,1; Concentración de dodecil sulfato de sodio = 40 mg/l.

Figure 4. As removal as function of Fe concentration in flotation test. Initial As concentration, 13,73, pH=5.1, concentration of dodecil sulfate of sodium 40 mg/l.

Figura 5. Efecto de la relación Fe/As en la eliminación de arsénico en ensayos de flotación usando soluciones de concentración inicial 13,73 mg/l As y 1,71 mg/l As. Concentración de dodecil sulfato de sodio = 40 mg/l; pH = 5,0.

Figure 5. Effect of Fe/As ratio on As removal in flotation tes using solutions with initial concentration of 13,73 mg/land 1,71 mg/l of As. Concentration of dodecil sulfate of sodium 40 mg/l, pH 5,0.

publicados por Xiaoyuan *et al.*^[22] y Zhao *et al.*^[24], quienes trabajaron con concentraciones iniciales de arsénico de 15,41 mg/l y 20 mg/l, respectivamente, y emplearon dodecil sulfato de sodio como colector.

El aumento que se produce en la eliminación de arsénico desde la solución acuosa al incrementarse la concentración de hierro se explicaría por el crecimiento de la cantidad de hidróxido férrico disponible para adsorber los aniones que contienen arsénico. Xiaoyuan *et al.*^[22] señalan que el Fe(III) tiene un efecto sobre el rendimiento y la velocidad de crecimiento del floculo $\text{Fe}(\text{OH})_3$. De Carlo and Thomas^[21] indican que el aumento de la eliminación de arsénico en la presencia de mayores concentraciones de iones férricos es el resultado del aumento de la hidrólisis del hierro, lo que produce un incremento del área superficial disponible para la adsorción de HAsO_4^{2-} , AsO_4^{3-} y AsO_3^{3-} .

El efecto de la relación Fe/As en la remoción de arsénico en presencia de 40 mg/l de dodecil sulfato de sodio y pH 5, se muestra en las figuras 5 y 6. Se observa en ambas figuras que la eliminación de arsénico se incrementa al aumentar la relación Fe/As. En la figura 5 se alcanza una eliminación de 95 % de arsénico con una relación Fe/As del orden de 6:1 (13,73 mg/l As) y de 18:1 (1,71 mg/l As), mientras que, en la figura 6 se aprecia que con una relación Fe/As de aproximadamente 800:1 es posible obtener una eliminación de

Figura 6. Efecto de la relación Fe/As en la eliminación de arsénico en ensayos de flotación usando soluciones de concentración inicial de 0,105 mg/l As. Concentración de dodecil sulfato de sodio = 40 mg/l; pH = 5,0.

Figure 6. Effect of Fe/As ratio on As removal in flotation test using solutions with initial concentration of As of 0,105 mg/l. Concentration of dodecil sulfate of sodium 40 mg/l, pH 5,0.

arsénico del orden del 95 % al trabajar con una concentración inicial de 0,105 mg/l As.

Los resultados alcanzados en las pruebas de flotación por adsorción coloidal con soluciones de concentración inicial 13,73 mg/l As son muy similares con las relaciones Fe/As necesarias para obtener una alta eliminación de arsénico, publicadas por Xiaoyuan *et al.*^[22] y Zhao *et al.*^[24], y que son mostradas en la tabla I. Xiaoyuan *et al.*^[22] señalan que los resultados de las pruebas confirman que al aumentar la relación Fe/As se favorece la eliminación de arsénico. Así, con una relación Fe/As =8 y usando 40 mg/l de dodecil sulfato de sodio obtuvieron una eliminación de arsénico de 98 % desde aguas de desecho artificial que contenían 20 mg/l As. Por otra parte, Zhao *et al.*^[24] publicaron que la eliminación de arsénico desde una solución acuosa (15,41 mg/l As) aumentaba a medida que la concentración de Fe (III) crecía, obteniéndose una remoción de arsénico superior a 98 % con una relación Fe/As=7 y una concentración de dodecil sulfato de sodio de 54,13 mg/l.

Las figuras 5 y 6 permiten visualizar claramente lo siguiente: a) que la eliminación de arsénico crece con el aumento de la relación Fe/As; y b) que a medida que disminuye la concentración inicial de arsénico en la solución se requieren mayores razones Fe/As para obtener una alta eliminación de este elemento.

En la Tabla 1 se muestran los resultados obtenidos en el presente trabajo y son comparados con los publicados en la literatura, con respecto al efecto de las relaciones Fe/As necesarias para la eliminación de arsénico desde soluciones acuosas utilizando flotación por adsorción coloidal.

4. CONCLUSIONES

Es posible la eliminación del orden del 95 % de los contenidos de arsénico en aguas mediante flotación por adsorción coloidal utilizando iones férricos como co-precipitantes o sorbentes y dodecil sulfato de sodio como colector, en un sistema de flotación por aire disuelto a nivel laboratorio.

Los mejores resultados fueron alcanzados en el rango de pH 4-5,5 produciéndose un aumento en la eliminación de arsénico al incrementarse la concentración de Fe (III).

Por otra parte, a medida que disminuye la concentración inicial de arsénico en la solución se requieren mayores relaciones Fe/As para obtener una alta eliminación de arsénico. Experimentos realizados en este trabajo con soluciones que tenían concentraciones de arsénico de 13,73 mg/l, 1,71 mg/l y 0,105 mg/l, mostraron que se requerían relaciones de Fe/As del orden de 6:1; 18:1 y 800:1, respectivamente, para la eliminación de aproximadamente el 95 % del arsénico.

REFERENCIAS

- [1] F. Pérez-Moreno, F. Prieto-García, A. Rojas-Hernández, Y. Marmolejo- Santillán, E. Salinas-Rodríguez y F. Patiño-Cardona, *Rev. Metal. Madrid*. 42 (2006) 391-395.
- [2] S. Yamamura, *Global concern on the arsenic problem in drinking water and current response*, Int. Sem. Latin American Experience in Environmental Management, 2000, CENMA, Chile, 1-9.

Tabla I. Diferentes valores de relaciones Fe/As que permiten alcanzar una alta eliminación de arsénico mediante flotación por adsorción coloidal publicados en la literatura comparados con los valores obtenidos en el presente trabajo.

Table I. Different values of Fe/As ratio that allow to reach high removal of As by flotation by colloidal adsorption reported in literature compared with the values obtained in the present work.

Concentración de arsénico (mg/l)	Colector	pH	Relación Fe/As	Eliminación de arsénico (%)	Referencia
20	Dodecil sulfato de sodio	4-4,8	8:1	98	Xiaoyuan <i>et al.</i> ^[22]
15,41	Dodecil sulfato de sodio	4,0	7:1	>98	Zhao <i>et al.</i> ^[24]
13,73	Dodecil sulfato de sodio	5,0	8:1	95	Presente trabajo
1,71	Dodecil sulfato de sodio	5,0	18:1	95	Presente trabajo
0,100	Lauril sulfato de sodio	4-5,5	1100:1	73	De Carlo and Thomas ^[21]
0,105	Dodecil sulfato de sodio	5,0	800:1	95	Presente trabajo

- [3] T. Yoshida, H. Yamauchi y G. Fan Sun, *Toxicol. Appl. Pharm.* 198 (2004) 243-252.
- [4] R.R. Walvekar, S.V. Kane, M.S. Nadkarni, I.N. Bagwan, D.A. Chaukar y A.K.D. D' Cruz, *J. Cutan. Pathol* 34 (2006) 203-206.
- [5] E. Kociolet-Balawejder y D. Ocinski, *Przemysł Chemiczny* 85 (2006) 19-26.
- [6] A.H. Mirza, and V. Ramachandran, *Removal of arsenic and selenium from wastewaters – A review. Second Int. Symp Extraction and Processing for the Treatment and Minimization of Wastes* (Edited by Ramachandran, V. and Nesbitt, C.C.), The Minerals, Metals & Materials Society, 1996, p. 563.
- [7] V.N. Tien, D.S. Chaudhary, H.H. Ngo y S. Vigneswaran, *J. Ind. Eng. Chem.* 10 (2004) 337-348.
- [8] L. Dambies, *Sep. Sci. Technol.* 39 (2004) 603-627.
- [9] O.M. Vatutsina, V.S. Soldatov, V.I. Sokolova, J. Johann, M. Bissen y A. Weissenbacher, *React. Funct. Polym.* 67 (2007) 184-201.
- [10] B. Nayak, M.A. Hossain, M.K. Sengupta, S.Ahamed, B. Das, A. Pal y A. Mukherjee, *Water. Qual Res. J. Can.* 41 (2006) 333-340.
- [11] V.K. Gupta, V.K. Saini y N. Jain, *J. Colloid Interf. Sci.* 288 (2005) 55-60.
- [12] H. Garelick, A. Dybowska, E. Valsami-Jones y N.D. Priest, *J. Soils Sediments* 5 (2005) 182-190.
- [13] P. Westerhoff, D. Highfield, M. Badruzzaman y Y. Yoon, *J. Environ. Eng. Asce* 131 (2005) 262-271.
- [14] S.R. Wickramasinghe, H. Binbing, J. Zimbron, Z. Shen y M.N. Karim, *Desalination* 169 (2004) 231-244.
- [15] J. Iqbal, H.J. Kim, J.S. Yang, K. Baek y J.W. Yang, *Chemosphere* 66 (2007) 970-976.
- [16] M.P. Elizalde-González, W.D. Mattusch, D. Einicke y R. Wennrich, *Chem. Eng. J.* 81 (2001) 187-195.
- [17] S. Shevade y R.G. Ford, *Water Res.* 38 (2004) 3.197-3.204.
- [18] S. Nakashima, *Analyst* 103 (1978) 1031-1036.
- [19] E.H. De Carlo y H. Zeitlin, *Anal. Chem.*, 53 (1981) 1.104-1.107.
- [20] X. Feng y D.E. Ryan, *Anal. Chem. Acta* 162 (1984) 47-55.
- [21] E.H. De Carlo y D.M. Thomas, *Environ. Sci. Technol.* 19 (1985) 538-544.
- [22] X. Xiaoyuan, C. Jin y G. Changhuai, *XVII th Int. Mineral Processing Congress*, Dresden, 1991, p. 419-427.
- [23] F.F. Peng y P. Di, *Ind. Eng. Chem. Res.* 33 (1994) 922-928.
- [24] Y. Zhao, A.I. Zouboulis y K.A. Matis, *Sep. Sci. Technol.* 31 (1996) 769-785.
- [25] G.B. Harris, S. Monette, *The estabilyty of arsenic – bearing residues. In: Arsenic Metallurgy – Fundamentals and Applications*, eds. R.G. Reddy, J.L. Hendrix y P.B. Quenau, The Metallurgical Society of AIME, Warrendale, Pennsylvania, 1988, p. 469.
- [26] N. Papassiopi, M. Stefanakis y A. Kontopoulos, *Removal of arsenic from solutions by precipitation as ferric arsenates. In Arsenic Metallurgy – Fundamentals and Applications*, eds. R.G. Reddy, J.L. Hendrix, y P.B. Quenau. The Metallurgical Society of AIME, Warrendale, Pennsylvania, 1988, p. 321.
- [27] E. Krause y V.A. Ettel, *Hydrometallurgy* 22 (1989) 311-337.
- [28] J. Nanor, M. Misra, S. Chen, *Characterization of iron – arsenate and lanthanum – arsenate precipitated compounds. In Analytical Technology in the Mineral Industries*, eds. Cabri, J.L., Buckman, C.H., Milosavljevic, E.B., Chrysosoulis, S.L. and Miller, R.A., The Minerals, Metals & Materials Society, 1999, p. 95.
- [29] G.A. Parks, *Chem. Rev.* 65 (1965) 177-198.
- [30] G.A. Parks, *Adsorption in the marine environment, Chemical Oceanography*, eds. J.P. Riley and G. Skirrow, Academic Press, 2nd edition, 1975, chapter 4, p. 241.
- [31] T.E. Chatmann, S.D. Huang and D.J. Wilson, *J. Sep. Sci.* 12 (1977) 461-484.