

EXTRACCIÓN CON SOLVENTES DE Fe CONTENIDO EN SOLUCIONES PROVENIENTES DE LA LIXIVIACIÓN DE ARCILLAS CAOLINÍTICAS UTILIZANDO COMO EXTRACTANTES D2EHPA Y CYANEX 272

Astrid D. Toache^a, Leticia E. Hernández^a, Gretchen T. Lapidus^b, Felipe Legorreta G.^a

^aÁrea Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, UAEH, Mineral de la Reforma, Hidalgo
astrid.toache@gmail.com, hcruz@uaeh.reduaeh.mx, felegorreta@hotmail.com

^bDepartamento de Ingeniería de Procesos e Hidráulica, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, D.F., gtl@xanum.uam.mx

RESUMEN

Recientemente Olvera-Venegas [1] desarrolló un método para el blanqueamiento de arcillas caoliníticas mediante el uso de ácido cítrico y tiosulfato de sodio, pero los licores provenientes de este proceso contienen grandes concentraciones de hierro, lo cual impide que puedan ser vertidos sin tratamiento previo. Para eliminar el hierro, en este trabajo se presentan los resultados obtenidos en las pruebas de extracción con solventes utilizando los extractantes D2EHPA (0.6 y 1.5 M) y Cyanex 272 (1.7 y 3 M), diluidos en queroseno y tolueno y una mezcla de ambos solventes (0.2 M D2EHPA y 2 M Cyanex 272, diluidos en queroseno). Para elucidar el comportamiento de los solventes, los experimentos se realizaron, tanto con soluciones sintéticas de hierro (FeSO_4 y $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$) con ácido cítrico (0.9M), como con los licores de lixiviación. La variable de estudio fue la concentración de los extractantes, manteniendo constante el pH en 3 durante 60 minutos. Se utilizó una solución de 200 g L^{-1} de ácido sulfúrico como solución de despojo. Para cuantificar el porcentaje de extracción y de despojo de hierro se utilizó espectrometría de absorción atómica. Los mejores resultados de extracción se lograron con ambas concentraciones de D2EHPA (0.6 y 1.5 M) para las soluciones sintéticas: 100% para Fe^{2+} , 98.5% para Fe^{3+} y 92% de extracción, para el licor de lixiviación. En cuanto al despojo del solvente cargado el mejor resultado se obtuvo al despojar el Cyanex 272, a cualquier concentración a la que se trabajó, llegando a re-extraer hasta un 91.5% de hierro, de igual manera en la mezcla de ambos solventes se llegó a un porcentaje de despojo de 75.8% para el Fe^{2+} y 44% para el licor de lixiviación.

Palabras Clave: Hierro, caolín, D2EHPA, Cyanex 272, ácido cítrico.

ABSTRACT

Recently Olvera-Venegas [1] developed a method for bleaching kaolinitic clays using citric acid and sodium thiosulfate; however, the liquor from this process contains high concentrations of iron which prohibits an untreated discharge. To eliminate iron from these solutions, in this paper, the results of solvent extraction with D2EHPA (0.6 y 1.5 M) or Cyanex 272 (1.7 y 3 M), diluted in kerosene and toluene, respectively, or a mixture of both extractants (D2EHPA (0.2 M)/Cyanex 272(2 M)), diluted

in kerosene) are presented. To elucidate the behavior of the solvents, experiments were performed with both synthetic solutions of iron (FeSO_4 and $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$), as with the leach liquor. The concentration of the extractants was varied, maintaining constant the pH at 3 during 60 minutes. An aqueous sulfuric acid solution (200 g L^{-1}) was used for stripping. The percentage of iron extraction and stripping was quantified in the aqueous phase using atomic absorption spectrometry. The best extraction results for synthetic solutions were 100% for Fe^{2+} , 98.5% for Fe^{3+} and 92%, for the leach liquor using both concentrations of D2EHPA (0.6 and 1.5 M).

Keywords: Iron, kaolin, D2EHPA, Cyanex 272, citric acid.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad el desarrollo de diversas industrias va acompañado con un aumento en la generación de efluentes industriales que generalmente contienen metales pesados y valores de pH muy ácidos o alcalinos que en conjunto provocan un impacto negativo en el medio ambiente y en la salud de todos los seres vivos. Al lixiviar la arcilla caolinítica del municipio de Huayacocotla del Estado de Veracruz, con ácido cítrico como agente complejante y tiosulfato de sodio como agente reductor, los licores obtenidos presentan importantes concentraciones de hierro (Fe) y orgánicos; por lo tanto no pueden ser vertidos o desechados al entorno, debido a que la presencia de estas sustancias pueden afectar la potabilidad del agua y en general no es conveniente en las aguas industriales por dar lugar a depósitos e incrustaciones [2]. Por tal motivo es necesario purificar dichos licores antes de verterlos al medio ambiente con la finalidad de disminuir el efecto contaminante de los mismos. Para el tratamiento de los efluentes líquidos, existen diferentes métodos físico-químicos, dentro de los cuales se encuentran la precipitación química, la electro-obtención, tecnologías de membranas, la extracción con solventes, entre otros. En este trabajo se empleó la extracción con solventes por ser uno de los procesos más efectivos y económicos para purificar, concentrar y separar los metales a partir de soluciones provenientes de procesos de lixiviación [3].

Además, una ventaja adicional que ofrece esta técnica es que no requiere o resulta en una modificación de la solución lixivante, permitiendo su re-utilización dentro del proceso. En este sentido, en 1979 Islam y colaboradores realizaron un estudio de la extracción con solventes de titanio (IV), hierro (III) y hierro (II) utilizando ácido di-2-etil hexil fosfórico en benceno, obteniendo muy buenos resultados, con una máxima extracción de titanio(IV) y hierro (II) a 50°C [4]. Nuevamente en el año de 1985 éstos mismos autores, realizaron pruebas para la extracción de los mismos tres iones, ahora utilizando un sistema Di-tolil-ácido fosfórico y benceno; mostraron que se obtiene el mayor porcentaje de extracción de Fe(II) a mayor concentración de este extractante y con cierta acidez acuosa [5]. Chu Yong en el 2000 realizó un estudio para la extracción con D2EHPA modificando el pH y la temperatura para recuperar diversos metales, encontrando para siete elementos de interés el siguiente orden de extracción $\text{Zn(II)} > \text{Ca(II)} > \text{Mn(II)} > \text{Cu(II)} > \text{Co(II)} > \text{Ni(II)} > \text{Mg(II)}$. La mejor separación para estos elementos de valencia 2+ se logró a un pH de 3 a una temperatura de 23°C [6]. Flett a través de su estudio realizado en el 2005 sobre el papel de los agentes de extracción organofosforados, describe como el D2EHPA y el Cyanex 272 tienen alto grado de selectividad para extraer Fe(III) de soluciones a diversos valores de pH [3].

A su vez en 2008, Borges y colaboradores realizaron una extracción selectiva de Zn(II) y Fe(II) en efluentes con ácido clorhídrico usando TBP, Cyanex 272, 301 y 302, observando que a valores de pH muy ácidos se obtiene buena extracción tanto de Fe(II) y Fe(III) utilizando Cyanex 272 y 301 [7]. Por otra parte, en el 2011 Gotfryd y colaboradores, a partir de su estudio de recuperación del Zinc a partir de desechos, se percataron que el D2EHPA y el Cyanex 272 son excelentes extractantes para diferentes metales con valencia 2+ (Fe, Zn, Cu, Cd, Co, etc.) [8]. De acuerdo a las referencias mencionadas anteriormente, en este trabajo se presenta el estudio del uso del ácido di-(2-etilhexil) fosfórico (D2EHPA) y el ácido bis(2,4,4-trimetilpentilo) fosfínico (Cyanex 272), para la extracción de Fe a partir de los licores de lixiviación de la arcilla caolinítica, mencionada. Como se aprecia, han sido utilizados con éxito para la extracción de especies metálicas que se encuentran en su forma catiónica como el Fe(II) y Fe (III), entre otros [9][10], además de presentar una estabilidad química, una extremadamente baja solubilidad y alta selectividad de extracción de metales en un amplio rango de condiciones.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Para las pruebas de extracción con solventes se prepararon, como fase acuosa, soluciones sintéticas de sulfato férrico [$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$] (marca Karal con un 73% de pureza) y otra solución de sulfato ferroso [FeSO_4] (marca Meyer, con una pureza de 99%), ambas a una concentración de 8 g L^{-1} y, también, con una concentración de 0.9 M de ácido cítrico (marca J.T. Baker con 99% de pureza), a las cuales se les ajustó el pH a 3 con hidróxido de sodio (marca Meyer con una pureza de 97%) y/o ácido sulfúrico (marca UT Baker a una pureza del 98.08%), utilizando un medidor de pH (marca Orion 710A con un electrodo marca Thermo Scientific). Se utilizó el licor de lixiviación de la arcilla caolinítica sin hacerle alguna modificación, su obtención y características han sido descritas en artículos previos [11], donde se explica el procedimiento de saturación de los mismos al recircular hasta por tres ocasiones el licor de lixiviación en el proceso de blanqueo de las arcillas caoliníticas. Para la preparación de la fase orgánica se emplearon primeramente por separado al extractante D2EHPA (0.6 y 1.5 M), suministrado por Sigma Aldrich (97% ácido di-(2-etilhexil) fosfórico), y al Cyanex 272 (1.7 y 3 M) suministrado por Cytec (constituido por 90% de ácido bis(2,4,4-trimetilpentilo) fosfínico). Posteriormente, se utilizó una mezcla de ambos solventes (0.2 M D2EHPA y 2 M Cyanex 272, diluidos en queroseno). Debido a que la extracción del metal es controlada por el transporte de masa, para facilitar la transferencia de las especies se requiere disminuir la tensión superficial y la viscosidad de ambos solventes [12], por consiguiente el D2EHPA se disolvió en queroseno comercial suministrado por FAFC y el Cyanex 272 se disolvió en tolueno suministrado por Reasol (Tabla 1). Para realizar el despojo de las soluciones se preparó una solución de ácido sulfúrico con una concentración de 200 g L^{-1} . Los experimentos de extracción tanto para las soluciones sintéticas, como para el licor de lixiviación estudiados, se realizaron colocando en frascos de vidrio (con capacidad de 200 mL, con tapa plástica), volúmenes iguales de fase acuosa y orgánica. Se agitaron las mezclas a 80 rpm mediante el uso de una parrilla de agitación magnética (marca Corning), lo que promovió un contacto homogéneo y directo de ambas fases, durante un periodo de 60 minutos. Después de este tiempo las fases se separaron por decantación en embudos de separación. Para el procedimiento de despojo la fase orgánica (extractante cargado) se puso en contacto con un volumen igual de solución de ácido sulfúrico (200 g L^{-1}) y los experimentos se trabajaron de la misma manera que en la extracción. En ambos casos (extracción y despojo) se determinó la concentración del metal en la fase acuosa, utilizando un espectrómetro de absorción

atómica marca Varian SpectrAA, modelo 220, y a partir de un balance de materia se calculó el porcentaje de extracción y de despojo en cada experimento.

Tabla 1. Molaridades utilizadas en la preparación de la fase orgánica para la extracción de Fe en las soluciones sintéticas y en el licor de lixiviación de la arcilla caolinítica.

	D2EHPA	Cyanex 272
(M)	1.5	1.7
	0.6	3
Mezcla	0.2 2 diluido en queroseno	

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos para las pruebas de extracción realizadas con 1.5 M D2EHPA y 1.7 M Cyanex 272 se muestran en la Figura 1, donde es posible observar que la extracción de Fe(II) utilizando D2EHPA en queroseno fue del 99.8%; con el mismo extractante para el Fe(III) se recuperó el 98.7% y para el Fe del licor de lixiviación (LIX 4) la extracción fue del 92.4%. En la misma figura se nota que las extracciones correspondientes utilizando el Cyanex 272, fueron mucho más pobres.

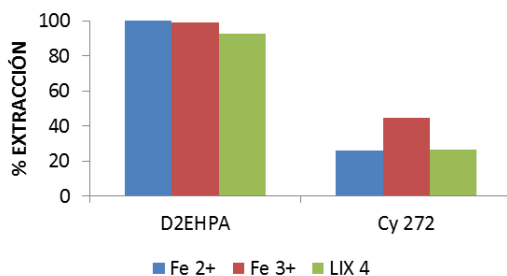


Figura 1. Porcentaje de extracción de hierro utilizando 1.5 M D2EHPA diluido en queroseno y 1.7M Cyanex 272, diluido en tolueno, con un tiempo de contacto de 60 minutos a 80 rpm.

Los resultados de las pruebas de despojo de los experimentos de extracción antes mencionados, se muestran en la Figura 2 en la que se observa que al utilizar ácido sulfúrico a 200 g L^{-1} no se logra una buena re extracción de Fe cuando se trabajó con el D2EHPA; con Fe(II) fue únicamente 1.2%, para el Fe(III) fue de 0.6% y para el Fe contenido en el licor de lixiviación fue del 1.1%. Lo anterior indica que el D2EHPA forma un enlace demasiado fuerte con los iones de hierro para poder despojarlos. En cambio, a partir de la solución cargada con Cyanex 272 proveniente de la lixiviación, el Fe despojado con ácido sulfúrico fue del 37.3%, aunque para el caso de las soluciones sintéticas de Fe(II) y Fe(III), fue nulo. Para disminuir la fuerza de extracción del D2EHPA para favorecer el despojo posterior, se empleó una concentración menor. En la Figura 3, se puede observar que a pesar de bajar la concentración de extractante de 1.5 a 0.6 M D2EHPA, este sigue siendo eficiente,

obteniendo un porcentaje de extracción de Fe(II) de 100%, de 98.5% para el Fe(III) y de 84.2% de Fe contenido en el licor de lixiviación. Para el caso del Cyanex 272 se aumentó su habilidad al trabajar con una concentración mayor [3 M]; la extracción de Fe(II) alcanzó un valor del 70%, para el Fe(III) fue de 73.9% y para el Fe del licor de lixiviación fue de 36.4%.

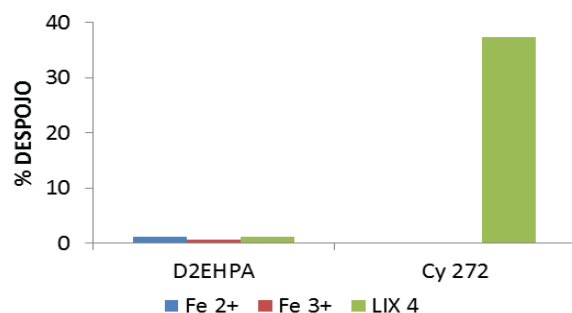


Figura 2. Porcentaje de despojo (con ácido sulfúrico 200 g L^{-1}) de los extractantes cargados utilizando 1.5 M D2EHPA diluido en queroseno y 1.7 M Cyanex 272 diluido en tolueno, con un tiempo de contacto de 60 minutos a 80 rpm.

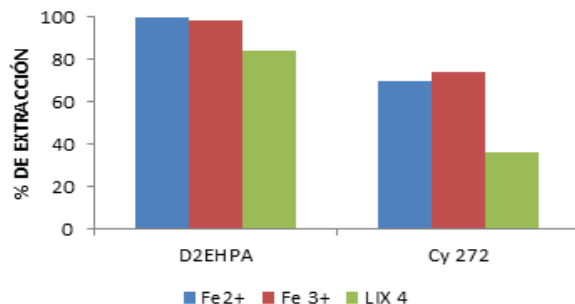


Figura 3. Porcentaje de extracción de hierro utilizando 0.6 M D2EHPA diluido en queroseno y 3M de Cyanex 272 diluido en tolueno, con un tiempo de contacto de 60 minutos a 80 rpm.

En la Figura 4 se muestran los resultados del despojo de las pruebas mostradas en la figura anterior, en la que se observa que el despojo sigue siendo mejor para el Cyanex 272 (el porcentaje para el despojo de Fe(II) fue del 91.5%, para el Fe(III) fue del 70.5% y para el contenido en el licor de lixiviación fue del 100%. En tanto que el despojo para cuando se utilizó D2EHPA, permaneció en valores inferiores; para el Fe(II) sólo se logró despojar el 2.5%, para el Fe(III) fue del 2.1% y para el contenido en el licor de lixiviación se despojó el 2.7%.

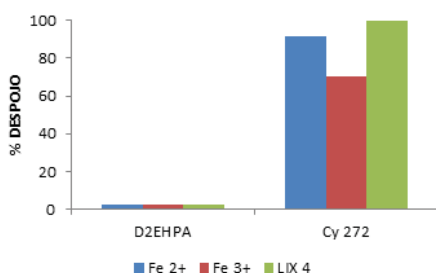


Figura 4. Porcentaje de despojo de los extractantes cargados utilizando 0.6 M D2EHPA diluido en queroseno y 3 M Cyanex 272 diluido en tolueno, con ácido sulfúrico con concentración de 200 g L^{-1} , ambos con un tiempo de contacto de 60 minutos a 80 rpm.

De acuerdo a los resultados anteriores se decidió probar con una mezcla de solventes utilizando de 0.2 M D2EHPA y 2 M Cyanex 272 diluidos en queroseno. Se muestra los resultados de extracción en la Figura 5, en la que se puede observar que el porcentaje de extracción de Fe (II) fue del 99.3% y para la extracción de Fe de los licores de lixiviación fue de 80%.

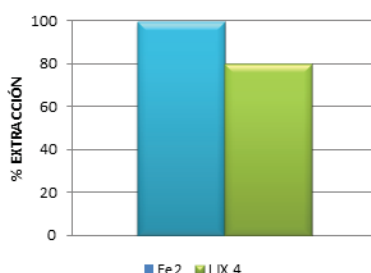


Figura 5. Porcentaje de extracción de hierro utilizando una mezcla de 0.2M de D2EHPA y 2M de Cyanex 272 diluidos en queroseno, con un tiempo de contacto de 60 minutos a 80 rpm.

Los resultados del despojo al usar la mezcla de solventes se muestran en la Figura 6. Se aprecia que para el Fe(II) se obtuvo 75.8% y para el licor de lixiviación fue 44% de re-extracción de Fe.

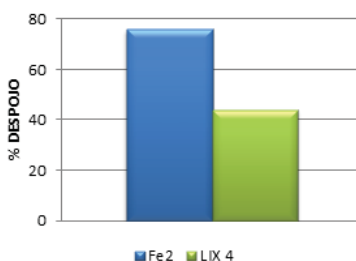
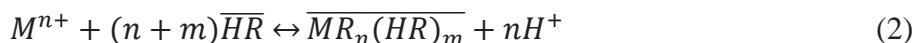


Figura 6. Porcentaje de despojo de la mezcla de 0.2 M D2EHPA y 2 M Cyanex 272 diluidos en queroseno, con ácido sulfúrico a una concentración de 200 g L^{-1} , con un tiempo de contacto de 60 minutos a 80 rpm.

Los comportamientos observados obedecen a la Ley de Distribución, derivada a finales de 1891 por Nernst [13] la cual explica que la distribución de un soluto entre dos fases inmiscibles es constante e independiente de la cantidad del soluto que se disuelva o del volumen del líquido empleado. De manera general el equilibrio de extracción para el soluto A, que pasa de una fase acuosa (A(aq)) a una fase orgánica (A(org)), está dada por la ecuación (1).



Cuando entran en contacto las fases (acuosa y orgánica) se permite que el extractante, presente en la fase orgánica, reaccione intercambiando su catión por el soluto disuelto en la fase acuosa. La reacción que se lleva a cabo tanto para el D2EHPA como para el Cyanex 272 es de intercambio iónico donde se forma un complejo extractante-metal, la reacción se describe mediante la ecuación 2.



en donde las especies testadas se encuentran en la fase orgánica (HR corresponde a D2EHPA o Cyanex 272). Al existir un intercambio entre los protones ligados al extractante, el rendimiento de extracción depende del pH y el despojo debe realizarse en un medio ácido, a un pH inferior al de extracción de manera que el equilibrio se desplace a la izquierda liberando al metal M^{n+} que se recuperó en la extracción [14]. La constante termodinámica que representa la reacción de extracción se puede expresar en función de la concentración y de los coeficientes de actividad de la siguiente manera (ecuación (3)).

$$k_{ext}^0 = \frac{[\overline{MR_n(HR)_m}] \cdot \gamma_{[\overline{MR_n(HR)_m}]} \cdot (H^+)^n \cdot \gamma_{[H^+]^n}}{[M^n] \cdot \gamma_{[M^n]} \cdot [\overline{HR}]^{(n+m)} \cdot \gamma_{[\overline{HR}]^{(n+m)}}} \quad (3)$$

Donde γ_i es el coeficiente de actividad molar de las especies.

La constante aparente de la extracción queda expresada como se observa en la ecuación (4), y ésta depende de las condiciones del medio.

$$k_{ext} = \frac{[\overline{MR_2}][H^+]^n}{[M^n][\overline{HR}]^2} \quad (4)$$

Para poder determinar la eficiencia del sistema de extracción, se puede utilizar el coeficiente de distribución, el cual se define como la relación de la concentración del ion metálico en la fase orgánica, entre la concentración del ion metálico en fase acuosa (ecuación (5)).

$$D = \frac{[\overline{M}]_T}{[M]_T} \quad (5)$$

De esta manera los valores obtenidos para la constante aparente de extracción y del coeficiente de distribución del ión metálico de cada una de las concentraciones de los extractantes se muestran a continuación en la Tabla 2:

Tabla 2. Valores de la constante aparente de extracción y del coeficiente de distribución del ion metálico para el D2EHPA y el Cyanex 272.

EXTRACTANTE	K_{ext}	D
Cyanex 272-Fe(II)	0.0003	0.3
Cyanex 272-Fe(III)	0.0004	0.55
D2EHPA-Fe(II)	0.029	1
D2EHPA-Fe(III)	0.015	0.99

Cuando el coeficiente de distribución (D) es igual a 1, se dice que el soluto se encontrará igualmente distribuido entre ambas fases [8].

4. CONCLUSIONES

En el presente trabajo fue posible extraer el hierro contenido en los licores de lixiviación de la arcilla caolinítica utilizando por separado los extractantes comerciales D2EHPA (diluido en queroseno) y Cyanex 272 (diluido en tolueno) a diferentes concentraciones y una mezcla de ambos solventes (D2EHPA a 0.2M y Cyanex 272 a 2M) diluidos en queroseno. Los resultados obtenidos mostraron que se obtiene una mejor extracción del ion Fe utilizando el extractante comercial D2EHPA diluido en queroseno, llegando a extraer hasta un 100% de Fe(II), un 98% de Fe(III) y 92% del Fe contenido en los licores de lixiviación. De igual manera cuando se utilizó la mezcla de ambos solventes se observó que los porcentajes de extracción se mantuvieron en niveles óptimos llegando a extraer un 99% de Fe(II) y un 80% del Fe contenido en los licores de lixiviación. Para las pruebas de despojo del extractante cargado con el ion Fe se observó que los mejores resultados se obtiene tanto al descargar el Cyanex 272 como al descargar la mezcla de ambos extractantes (D2EHPA 0.2M Y Cyanex 272 2M), puesto que el D2EHPA sólo, no permitía el despojo. De acuerdo a lo anterior se deduce que es posible extraer el Fe contenido en los licores de lixiviación de la arcilla caolinítica utilizando el extractante D2EHPA o la mezcla de D2EHPA y Cyanex 272, con la finalidad de verter o reutilizar dichos licores.

BIBLIOGRAFÍA

1. OLVERA VENEGAS P. N., (2014). “Estudio del blanqueo de arcillas caoliníticas por medio de lixiviación”, Tesis Doctoral, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Hidalgo, México.
2. RIGOLA LAPEÑA M., “*Tratamiento de aguas industriales: Aguas de proceso y residuales*” [en línea]. Barcelona, España: Marcombo, S. A., 1990. [Consulta: 25 mayo 2015]. Disponible en: <http://google.com.mx/books>
3. FLETT S. D., “*Solvent extraction in hydrometallurgy: the role of organophosphorus extractants*”, Journal of Organometallic Chemistry, No. 690 (2005), p. 2426-2438.
4. ISLAM M. F., BISWAS, R. K., MUSTAFA, C. M., “*Solvent Extraction Separation Study of Ti(IV), Fe(III) and Fe(II) from Aqueous Solutions with Di-2-Ethyl Hexyl Phosphoric Acid in Benzene*”, Journal of Inorganic and Nuclear Chemistry, Vol. 41, No.2 (1979), p. 217-221.

5. ISLAM M. F., BISWAS, R. K., MUSTAFA, C. M., “Solvent extraction of Ti(IV), Fe(III) and Fe(II) from acidic sulfate medium with di-o-tolyl phosphoric acid-benzene-hexan-1-ol system: a separation and mechanism study”, Hydrometallurgy, Vol. 13, No. 3 (1985), p. 365-376.
6. CHU YONG C., “Purification of synthetic laterite leach solution by solvent extraction using D2EHPA”, Hydrometallurgy, Vol. 56, No. 1 (2000), p. 369-386.
7. BORGES MANSUR M., Ferreira Rocha, S. D., Silva Magalhaes, F., dos Santos Benedetto, J., “Selective extraction of zinc (II) over iron(II) from spent hydrochloric acid pickling effluents by liquid-liquid extraction”, Journal of Hazardous Materials, Vol. 150 (2008), p. 669-678.
8. GORFRYD L., CHMIELARZ A., SZOŁOMICKI Z., “Recovery of zinc from arduous wastes using solvent extraction technique Part I. Preliminary laboratory studies”, Physicochem. Probl. Miner. Process, Vol. 47 (2011), p. 149-158.
9. DUPERLY YADURO G., LAVERDE D., ESCALANTE H., “Extracción líquido-líquido de bario con DEPHA: equilibrio químico”, Revista Facultad de Ingeniería, No. 36 (2006), p. 110-121.
10. NATHSARMA K. C., DEVI N., “Separation of Zn(II) and Mn(II) from sulphate solutions using sodium salts of D2EHPA, PC88A and Cyanex 272”, Hydrometallurgy, No. 84 (2006), p. 149-154.
11. TOACHE PÉREZ A. D., HERNÁNDEZ CRUZ, L. E., LAPIDUS LAVINE, G. T., LEGORRETA GARCÍA F., “Estudio de la posibilidad de reutilización del ácido cítrico y tiosulfato de sodio utilizados en el blanqueamiento de arcillas caoliníticas”, Memorias del XII Encuentro Participación de la Mujer en la Ciencia, Centro de Investigaciones en Óptica, León Gto. (2015), p. 1-5.
12. CERNÁ M., BIZEK V., STASTOVÁ J., Rod V., “Extraction of nitric acid with quaternary ammonium bases”, Chemical Engineering Science, Vol. 48, No. 1 (1992), p. 99-103.
13. KORMOS BARKAN D., “Walther Nernst and the Transition to Modern Physical Science”, New York: Cambridge University Press, 2011. ISBN: 978-0-521-17629-3.
14. HERNÁNDEZ PERALES L., (2013). “Extracción líquido-líquido de Zn(II) y Fe(III) empleando líquidos iónicos”, Tesis Doctoral, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Hidalgo, México.