Rev. LatinAm. Metal. Mat.

Artículo Regular

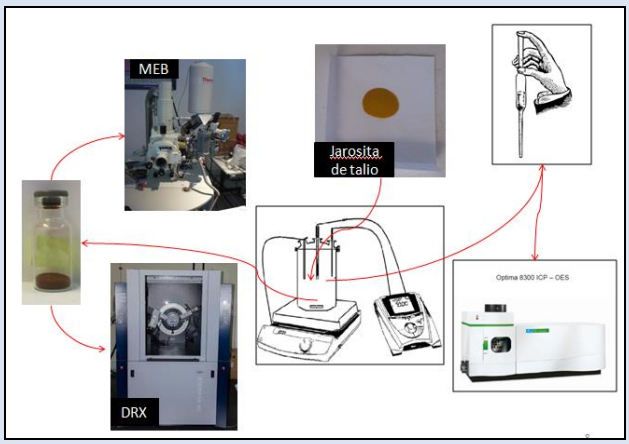
www.rlmm.org

SÍNTESIS, CARACTERIZACIÓN Y NATURALEZA DE LA REACCIÓN ALCALINA DE JAROSITA DE TALIO

Hernán Islas[1], Francisco Patiño[2], Martín Reyes[1], Mizraim U. Flores[3], Iván A. Reyes[4], Elia G. Palacios[5], Sayra Ordoñez[1], Víctor H. Flores[6]*

1: Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184 Hidalgo, México. 2: Ingeniería en Energía, Universidad Politécnica Metropolitana de Hidalgo 43860 Hidalgo, México. 3: Área de Electromecánica Industrial, Universidad Tecnológica de Tulancingo 43642 Hidalgo, México. 4: Catedrático CONACYT- Instituto de Metalurgia. Universidad Autónoma de San Luis Potosí 78210 S.L.P., México. 5: Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas, Instituto Politécnico Nacional, 07738 Cd. de México, México. 6: Escuela Superior de Zimapán. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42330, Hidalgo. México.

**e-mail: islas_79hv@yahoo.com.mx*



RESUMEN

En el proceso hidrometalúrgico del Cinc, la precipitación de jarosita es empleada como medio de eliminación de hierro, sulfato y metales alcalinos como el talio. Las jarositas se consideran un residuo industrial potencialmente peligroso que puede ser fácilmente filtrado y acumulado al aire libre, causando su descomposición por los agentes atmosféricos y la liberación de los metales tóxicos contenidos en la estructura, incluido el talio un elemento que es altamente tóxico para el ser humano. Este estudio contempla la síntesis y caracterización (MEB-EDS, DRX, ICP, gravimetría, etc.) de la jarosita de talio. Con los resultados se determinó la fórmula química aproximada: [Tl0.86(H3O)0.14Fe3.11(SO4)2.11(OH)6.11(H2O)0.44]. Las partículas muestran una geometría semiesférica con tamaños mayoritarios de 38-44 µm. El estudio de la naturaleza de la descomposición de la jarosita de talio se llevó a cabo en medio alcalino (NaOH) y con los resultados fue posible elaborar una curva tipo S de los iones SO42- y Tl+ que fueron liberados durante el proceso de descomposición. Los puntos experimentales obtenidos se ajustan al modelo de núcleo decreciente para partículas esféricas de tamaño constante, donde la reacción química controla el proceso de descomposición. Fueron analizados los sólidos parcialmente descompuestos por MEB-EDS, donde fue posible observar un núcleo sin reaccionar, un frente de reacción y una capa de ceniza. Los productos de la descomposición total corresponden a un compuesto amorfo de acuerdo a DRX.

Palabras clave: Jarosita de talio, naturaleza de la descomposición, modelo de núcleo decreciente.

SYNTHESIS, CHARACTERIZATION AND NATURE OF THE ALKALINE REACTION OF THALLIUM JAROSITE.

ABSTRACT

In the hydrometallurgical process of Cinc, the precipitation of jarosite particles is employed as means of the elimination of iron, sulfate and alkaline metals such as thallium. Jarosites are considered a potentially hazardous industrial waste that can be easily filtered and accumulated in outdoors, which causes their decomposition by atmospheric agents and the liberation of toxic metals contained in the structure, including thallium, an element that is highly toxic to humans. This study comprises the synthesis and characterization of the thallium jarosite (SEM-EDS, XRD, ICP, gravimetry, etc.). With the results was possible to determine the chemical formulae of the compound: [Tl0.86(H3O)0.14]Fe3.11(SO4)2.11(OH)6.11(H2O)0.44]. The particles showed a semispherical geometry with an average size from 38-44 µm. The study of the nature of the decomposition of thallium jarosite was carried out in alkaline medium (NaOH). With the obtained results it was possible to elaborate a S type curve for the SO42- and Tl+ ions that were liberated throughout the entire decomposition process. The obtained experimental points fits to the model of decreasing core for spherical particles of constant size, where the chemical reaction controls the whole of the decomposition process. Moreover we studied the partial decomposed solids using SEM-EDS, where it was possible to observe an unreacted core, a reaction front and a layer of ashes. The products of total decomposition correspond to an amorphous compound according to XRD results.

Keywords: Thallium jarosite, nature of the decomposition, model of decreasing core.

Recibido: 30-05-2016 ; **Revisado:** 03-12-2016

Aceptado: 27-01-2017 ; **Publicado:** 04-01-2017

DOI: *10.5281/zenodo.8217764*

1. INTRODUCCIÓN

El talio (Tl) es considerado un metal más tóxico para los humanos en comparación con el mercurio (Hg), cadmio (Cd) y Plomo (Pb) [1]. La solubilidad de los compuestos de talio es relativamente alta, de manera que el talio monovalente es transportado fácilmente a través de rutas acuosas en el medio ambiente [2].

En la mayoría de los concentrados minerales de cinc, el talio se encuentra en cantidades trazas que van desde 20 a 100 ppm, el cual es considerado una impureza indeseable en los circuitos de procesamiento hidrometalúrgico del cinc (Zn), debido a que puede co-precipitar en la electrolisis y contaminar el producto final, además de ser un elemento químico nocivo inclusive a concentraciones muy bajas. Por estos motivos, en el proceso hidrometalúrgico del cinc, el talio es separado como un precipitado fácilmente filtrable y posteriormente depositándolo en espacios abiertos [3,4].

El proceso de nucleación y crecimiento de partículas de jarosita se emplea en la hidrometalurgia del cinc, como un medio de precipitación del hierro, metales alcalinos como el talio y iones sulfato, en un compuesto con fórmula general: $MFe_3(SO_4)_2OH_6$, donde M puede ser: Tl^+, H_3O^+, Na^+, K^+, Rb^+, Ag^+, ½ Pb^{2+} y ½ Hg^{2+}, especies comúnmente encontradas en la industria así como en la naturaleza. La incorporación de talio en la estructura de la jarosita y la relativa estabilidad, permite ser utilizado en los circuitos hidrometalúrgicos para su eliminación [3,4,5]. Sin embargo la manera en que se incorpora puede influenciar la movilidad y biodisponibilidad en ambientes naturales o controlados. Tl incorporado en la estructura podría influenciar la solubilidad de la jarosita, potencialmente estabilizando la estructura bajo un amplio rango de condiciones que son toleradas por la jarosita pura. Así como también es importante conocer el comportamiento que puede presentar este tipo de compuestos sobre todo en medios alcalino, debido a que en la industria se emplea como medio de control de pH, así como en diferentes procesos de remediación ambiental. El empleo de NaOH nos permite condiciones alcalinas elevadas y libres de interferencias en la cinética [6].

A pesar de la importancia general de la precipitación de jarositas para el control de talio en la industria del cinc, este compuesto se puede considerar como un residuo industrial potencialmente peligroso, el cual es contenido en lugares abiertos expuesto directamente a los agentes atmosféricos, estas condiciones pueden influir en la descomposición de la jarosita y liberación de elementos tóxicos contenidos en ella hacia cuerpos de agua.

Alrededor de 400 toneladas de residuos jarosíticos se producen por día en plantas de cinc electrolítico en México; considerando una producción ininterrumpida de jarosita, se tiene un acumulado de cerca de 4 millones de toneladas [7].

El presente estudio tiene como finalidad dilucidar la estabilidad de la jarosita de talio en un medio fuertemente alcalino, ya que estos compuestos han demostrado elevada estabilidad en condiciones ácidas, ya que el talio u otros elementos tóxicos presentes en este tipo de compuestos pueden ser liberados en una forma biodisponible a los ecosistemas después de su disolución o descomposición.

Las condiciones y la metodología desarrollada en la síntesis de este compuesto, se determinaron en base a las investigaciones realizadas en la formación de jarositas sintéticas elaboradas por Dutrizac y Kaiman [5] y Patiño *et al*. [7,8,9]. Para el estudio de la descomposición, se basó en trabajos previos correspondientes en la naturaleza de la reacción y sus expresiones cinéticas en compuestos tipo jarosita argentíferas [8,9,10], así como también en la movilidad de metales tóxicos como el arsénico de sólidos tipo jarosita mediante el estudio de la cinética de descomposición de la jarosita con arsénico en medio alcalino de NaOH y $Ca(OH)_2$ [6,11,12], estableciendo el modelo cinético que mejor se ajusta a la descomposición de la jarosita de talio y la etapa controlante que describe dicho proceso. Los resultados obtenidos serán útiles en estudios cinéticos posteriores, donde será evaluado el efecto concentración, temperatura y tamaño de partícula sobre la velocidad de reacción de descomposición de la jarosita de talio en medio alcalino, con la finalidad de obtener información para evaluar el potencial impacto ambiental del talio en la etapa inicial de la reacción de disolución.

2. PARTE EXPERIMENTAL

2.1 Condiciones y procedimiento empleado para la síntesis de la jarosita de talio

La síntesis de la jarosita de talio se realizó en un reactor convencional de vidrio Pyrex de un litro de

©2017 Universidad Simón Bolívar

capacidad acoplado a un dispositivo de agitación mecánica y un condensador tipo serpentín, colocado sobre una parrilla de calentamiento con sensor de temperatura.

La metodología de la síntesis consistió en preparar una disolución de un litro de 0.25 mol L^{-1} $Fe_2(SO_4)_3$ y 0.032 mol L^{-1} Tl_2SO_4 (precursores grado reactivo), a una temperatura de 94 °C con un tiempo de reacción de 24 horas con una velocidad de agitación de 650 rpm.

El compuesto formado fue caracterizado por gravimetría para la determinación de sulfato (SO_4) y por espectrometría de plasma de inducción acoplado (ICP), para cuantificar el hierro (Fe), talio (Tl) y azufre (S). La jarosita se caracterizó por difracción de rayos X (DRX), microscopía electrónica de barrido (MEB) en conjunción con microanálisis por dispersión de energías de rayos X (EDS).

2.2 Naturaleza de la reacción de descomposición en medio NaOH de la jarosita de talio

Las condiciones y la metodología empleadas en el estudio de la naturaleza de descomposición en medio alcalino, se basó en trabajos realizados por Patiño *et al*. [9,6,11] y Reyes *et al*. [12].

Los experimentos se realizaron a presión atmosférica en un reactor de vidrio de medio litro, montado sobre una parrilla de calentamiento equipada con un controlador de temperatura y agitación magnética y para el monitoreo de la reacción, se empleó un sistema de medición de pH.

El procedimiento experimental de la descomposición alcalina de la jarosita de talio, consistió en agregar al reactor 0.2 g del producto previamente sintetizado con un diámetro de partícula de 38 µm a una disolución 0.01 mol L^{-1} NaOH (pH 11.66), a 30 °C y 650 rpm. Durante el desarrollo de la reacción se tomaron alícuotas de 5mL a distintos tiempos, para determinar por ICP las concentraciones del ion S y Tl en la solución. Los sólidos residuales también fueron caracterizados por DRX, MEB y EDS.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 En Difracción de Rayos X (DRX)

Los sólidos de la síntesis de la jarosita de talio, así como los sólidos residuales obtenidos en el experimento de la naturaleza de la reacción de descomposición, fueron caracterizados mediante un difractómetro modelo SIEMENS D-500, operado a una radiación de Cu Kα (λ= 1.5405 Å), a un voltaje de 30 kV e intensidad de 20 mA, realizando barridos en el rango *2-theta*= 20° - 90°, con un tamaño de paso 0.02° cada 42.9 s. La evaluación del espectro de difracción obtenido se realizó con la ayuda del software *Difract Plus XRD Comander Diffractometer* que incluye la base de datos *ICCD* (*International Center for Diffraction Data*), indicando que los picos de mayor intensidad del difractograma de la figura 1 indexa adecuadamente con la ficha PDF (00-0047-1768) de la estructura cristalina de la jarosita de talio ($Tl\ Fe_3(SO_4)_2(OH)_6$).

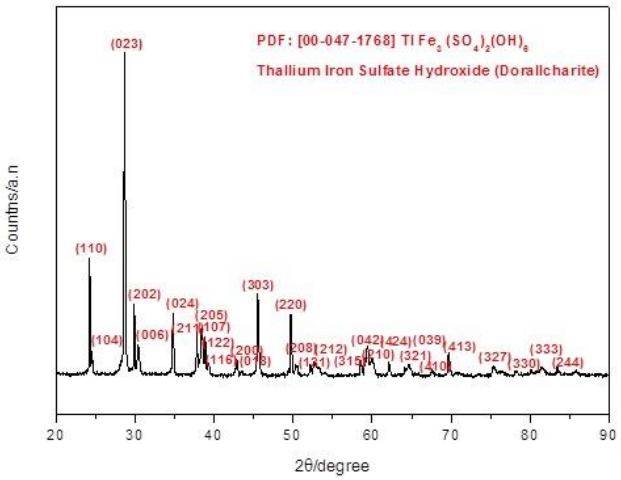


Figura 1. Difractograma de la síntesis de la jarosita de talio comparada con la ficha PDF de la Doralcherite (47-1768).

3.2 Análisis químico: gravimetría y espectrometría de plasma de inducción acoplado (ICP)

Se llevaron a cabo los análisis químicos de los elementos y especies que conforman la jarosita de talio. Mediante la técnica de gravimetría se realizó la determinación de sulfato (SO_4^{2-}) y mediante la técnica de espectrometría de acoplamiento inducción acoplado (ICP) fueron determinados el Fe, Tl y S. El equipo empleado fue la marca Perkin Elmer-Optima 3000-XL. En la tabla 1 se presentan de forma porcentual los resultados de los análisis por las técnicas antes mencionadas.

Con los resultados obtenidos del análisis químico y los obtenidos por DRX de la figura 1 [$Tl\ Fe_3\ (SO_4)_2\ OH_6$], fue posible calcular la fórmula aproximada de la jarosita de talio sintetizada en base a la fórmula teórica: $Tl_{0.86}\ (H_3O)_{0.14}\ Fe_{3.11}\ (SO_4)_{2.11}\ (OH)_{6.11}(H_2O)_{0.44}$; el contenido de $H_3O^+ + OH^- + H_2O$

fue determinado a través de un balance estequiométrico. La densidad experimental resultante mediante un picnómetro fue de 3.56 g cm^{-3}, similar al obtenido por Dutrizac y Kaiman (3.54 g cm^{-3}) [5].

Tabla 1. Composición química de la jarosita de talio sintetizada.

Especie	*% en peso*	*Técnica de análisis*
Fe	26,10	ICP
Tl	26,38	ICP
SO_4^{2-}	30,46	Gravimetría
$H_3O^+ + OH^- + H_2O$	17,06	Diferencia

3.3 Microscopía electrónica de barrido (MEB)

La figura 2 muestra una imagen general (A) del precipitado obtenido, observándose una distribución de partículas semiesféricas uniformes de jarosita de talio, donde los tamaños de las partículas son de aproximadamente de 30 a 40 µm. En la imagen a semidetalle (B) se aprecia una partícula de jarosita de talio de morfología semiesférica de alrededor de 40 µm de diámetro. A mayor detalle la imagen (C) de una partícula de jarosita de talio, es revelado que las partículas están constituidas por micro cristales romboédricos fuertemente soldados entre sí. Para la obtención de las imágenes se empleó un microscopio electrónico de barrido de bajo vacío, marca JEOL modelo JSM- 6701F.

El espectro de EDS (figura 3), muestra los elementos presentes de la jarosita de talio, con lo cual se confirma la presencia de las especies que conforman la jarosita de talio. Con los resultados de análisis químicos, rayos X y MEB-EDS se confirma que el precipitado obtenido corresponde a la jarosita de talio.

3.4 Naturaleza de la reacción de descomposición de la jarosita de talio en medio NaOH

La naturaleza de la reacción de la jarosita de talio sintética consistió en descomponer el producto obtenido en medio NaOH. La reacción de descomposición fue monitoreada en distintos intervalos de tiempo, con la finalidad de establecer el modelo cinético que mejor se ajuste a la descomposición y determinar la etapa controlante que describe el proceso de descomposición.

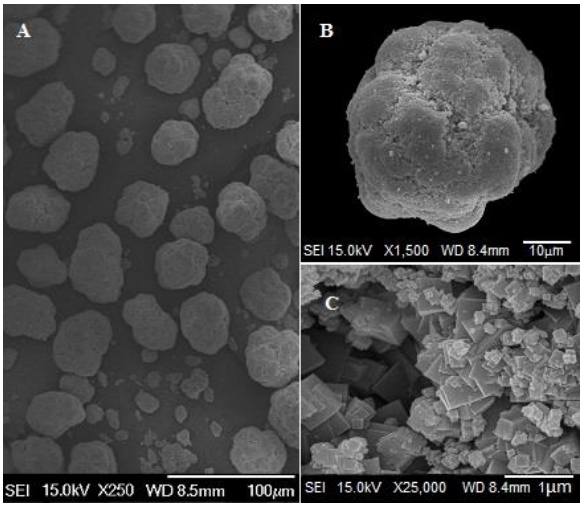


Figura 2. (A) Imagen general de distribución de tamaños de partícula de la jarosita de talio sintetizada, (B) imagen a semidetalle de una partícula de jarosita de talio de forma semiesférica y (C) imagen a detalle de una partícula de jarosita de talio conformada por micro cristales romboédricos.

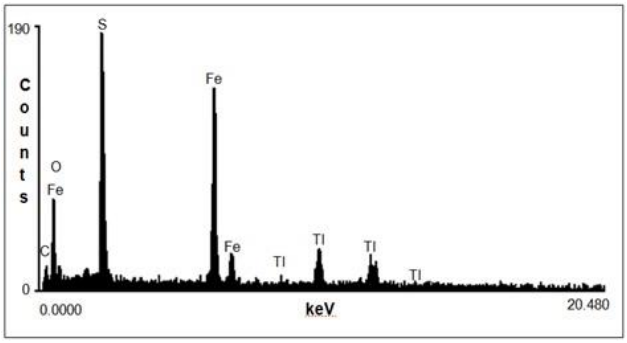


Figura 3. Análisis por EDS de la jarosita de talio.

3.4.1 Modelo Cinético

Antes que nada es necesario entender que cualquier modelo para el desarrollo de una reacción viene acompañado de una representación matemática, su ecuación de velocidad. Este modelo debe proporcionar una representación cercana a la realidad y que pueda emplearse sin excesiva complicación matemática. Para reacciones fluido-partículas sólidas, se consideran dos modelos simples idealizados, *el modelo de conversión progresiva*; donde el fluido reaccionante entra y reacciona al mismo tiempo en toda la partícula, y *el modelo de*

núcleo que se encoge sin reaccionar; se considera que la reacción inicia primero desde la exterior de la partícula desplazándose hacia el interior de la partícula [13].

Para definir el modelo que describe el proceso de descomposición de la jarosita de talio en medio alcalino se realizaron experimentos de descomposición parcial de las partículas sintetizadas, los sólidos residuales fueron caracterizados por MEB-EDS. La figura 4 muestra el perfil de reacción de la partícula, en la cual se observa un núcleo sin reaccionar, un frente de reacción y un halo de ceniza, por donde los iones (Tl y S) difunden hacia la solución, tal y como se muestra en los análisis puntuales por EDS del halo de cenizas y el núcleo sin reaccionar (figura 5), donde es posible apreciar que estas especies han difundido desde el núcleo sin reaccionar hacia la solución. En base a resultados obtenidos del comportamiento real de la reacción de descomposición de la jarosita de talio, el modelo de núcleo que se encoge sin reaccionar es el que mejor describe el proceso de descomposición.

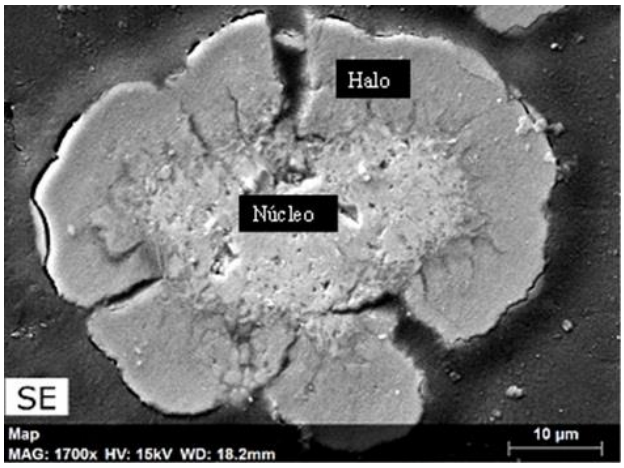


Figura 4. Imagen de una partícula parcialmente descompuesta de jarosita de talio en medio NaOH.

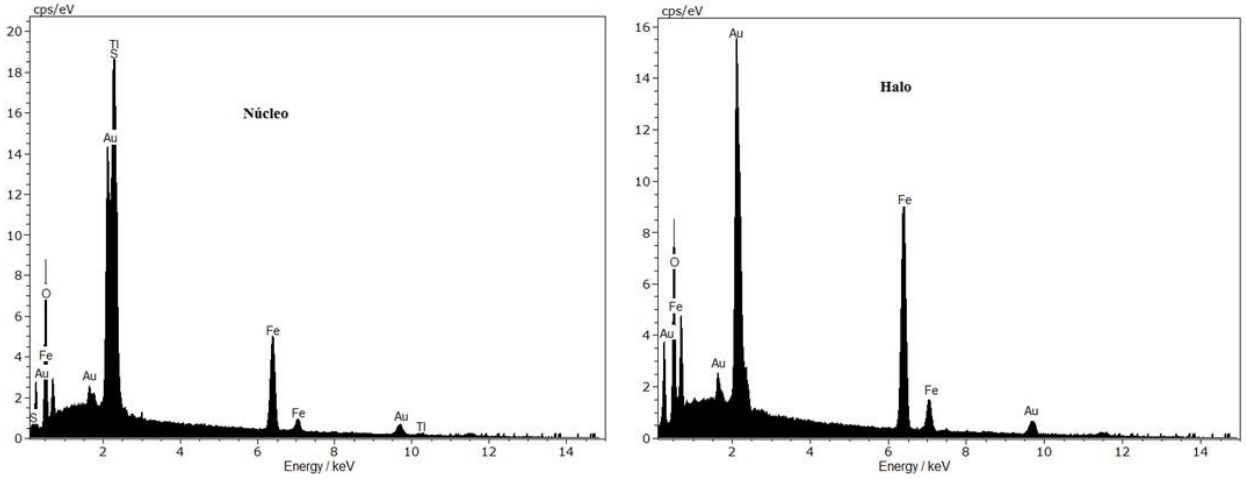


Figura 5. Análisis puntuales de EDS correspondientes al núcleo y halo de la partícula de jarosita parcialmente descompuesta.

La difusión de los elementos Tl y S en la reacción de descomposición también se puede visualizar a través de un mapeo realizado a la misma partícula de los elementos que componen la jarosita de talio parcialmente descompuesta. En la figura 6 se observa que los elementos Fe y O se encuentran distribuidos en toda la partícula, sin embargo el Tl y S solamente se encuentran en el núcleo, corroborando los resultados obtenidos por EDS.

3.4.2 Etapa controlante

La determinación de la etapa controlante de la reacción de descomposición de la jarosita de talio, se realizó determinando la concentración de los iones S y Tl en solución a distintos tiempos de reacción, mediante la técnica de análisis ICP. Los resultados se muestran en la tabla 2 y se representan como la fracción de jarosita de talio que ha reaccionado (X), donde se observa que el azufre y talio difunden del sólido hacia el seno del líquido, cuya concentración se incrementa conforme la reacción avanza hasta la

©2017 Universidad Simón Bolívar

descomposición total de la jarosita de talio y la concentración de estas especies permanece constante.

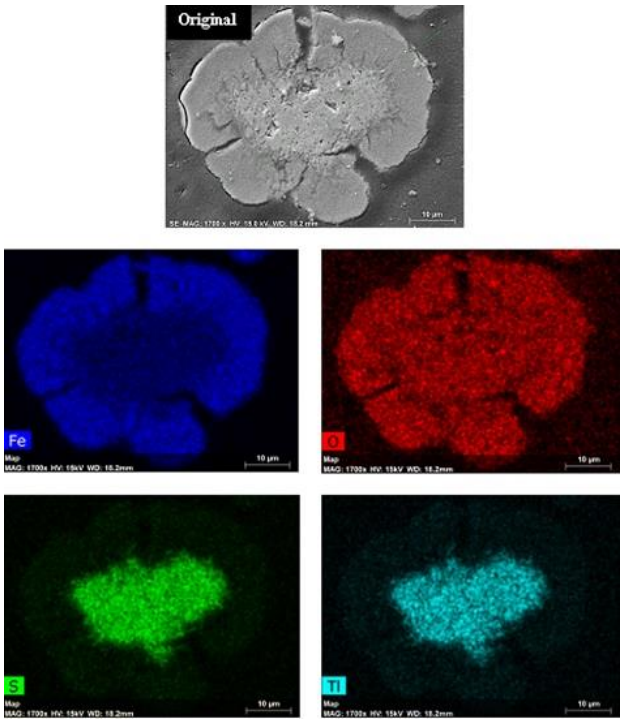


Figura 6. Mapeos de cada elemento que forman la partícula parcialmente descompuesta de jarosita de talio (NaOH, pH=11.91, 30 °C, 38 µm y 25min de reacción).

Con los datos de *X* fueron obtenidas las curvas tipo ***S*** de descomposición para el del S y Tl, como se aprecia en la figura 7**,** presentando en ambos casos un periodo de inducción, un periodo de conversión progresiva y una zona de estabilización de iones azufre y talio, que indica que la reacción de descomposición ha terminado.

Mediante los resultados de DRX, en la figura 8 se presentan los espectros realizados a los sólidos recuperados a distintos tiempos de descomposición (0 a 70min). Es posible observar que las intensidades de reflexión de los planos reticulares de la jarosita de talio inicial van disminuyendo conforme el tiempo de reacción se incrementa hasta desaparecer indicando que la descomposición total se llevó a cabo, dando lugar a la formación de un sólido amorfo probablemente constituido por hidróxido de hierro. Estos sólidos no evolucionan a nuevas fases cristalinas incluso para tiempos superiores al término de la reacción.

Tabla 2. Datos de la fracción de descomposición del ion azufre (S) y talio (Tl) a diferentes tiempos de reacción.

Espectrometría de plasma de inducción acoplado (ICP)		
t (min)	X_S	X_{Tl}
0	0	0
1	0,001	0,009
2	0,035	0,009
3	0,063	0,051
4	0,100	0,063
5	0,158	0,093
6	0,227	0,156
8	0,276	0,219
10	0,315	0,320
12	0,451	0,377
14	0,552	0,489
16	0,642	0,549
19	0,755	0,627
21	0,789	0,699
24	0,869	0,735
27	0,917	0,790
30	0,936	0,881
33	0,985	0,938
36	1,000	1,000
40	0,998	0,999

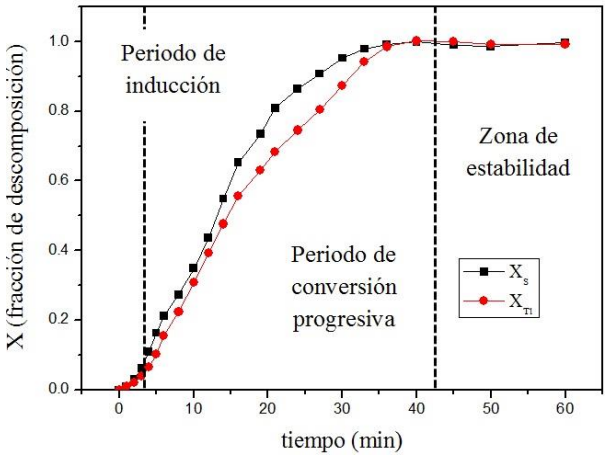


Figura 7. Curva de conversión-tiempo en medio NaOH 0.01 M, 30 °C, 38 µm de tamaño y 650 rpm, seguido mediante ICP.

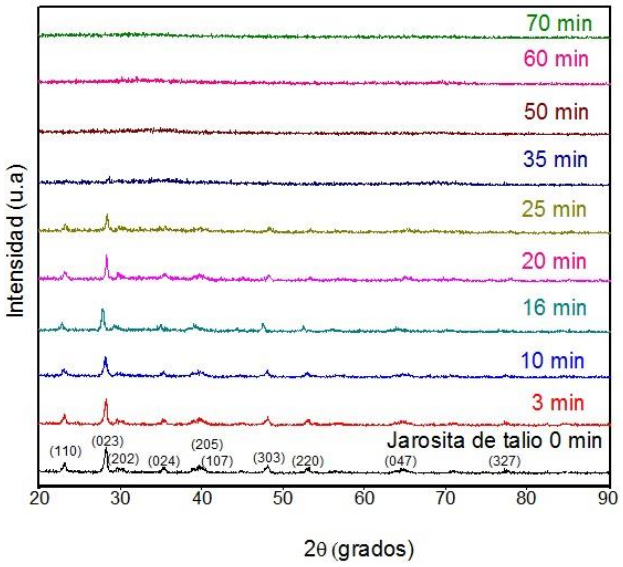


Figura 8. Difractogramas de la jarosita de talio sintética a distintos tiempos de reacción de descomposición en medio NaOH 0.01 M.

Para el caso del modelo núcleo decreciente con la formación de cenizas, dos etapas pueden ser las controlantes de la velocidad de reacción: el transporte de materia en la capa de productos sólidos (control por trasporte) descrita mediante la ecuación cinética:

$$f_1 = 1 - 3(1 - X)^{2/3} + 2(1 - X) \quad (1)$$

ó

$$f_2 = 1 - (1 - X)^{1/3} \quad (2)$$

para la reacción química en la superficie de la partícula (control químico), en ambas ecuaciones X es la fracción de sustancia que ha reaccionado. En la tabla 3 se presentan los resultados obtenidos en la curva de conversión tiempo para la descomposición de la jarosita de talio seguida por ion azufre, también se presentan los resultados de la evaluación de las ecuaciones correspondientes al control químico y por difusión en la capa de cenizas. Con los datos mostrados en la tabla 3 las gráficas de las figuras 9A, donde se evalúa el control químico y 9B, donde se evalúa el control por transporte de materia en la capa de residuos sólidos para el periodo de conversión progresiva, donde se observa que los puntos experimentales dan por resultado un coeficiente de regresión R^2= 0.98 para el control químico y R^2= 0.95 para el control por transporte. Estos valores del coeficiente de correlación indican que la velocidad de la reacción después del periodo de inducción está regida por la etapa de control químico.

Tabla 3. Aplicación de los modelos de control químico y control por transporte a los datos experimentales.

t (min)	X_S	*Control Químico*	*Control por transporte*
3	0,063	0,025	0,001
4	0,100	0,041	0,004
5	0,153	0,065	0,012
6	0,227	0,095	0,025
8	0,276	0,118	0,038
10	0,315	0,135	0,050
12	0,451	0,206	0,110
14	0,552	0,267	0,176
16	0,642	0,328	0,253
19	0,755	0,425	0,389
21	0,789	0,455	0,432
24	0,869	0,554	0,581
27	0,917	0,633	0,695
30	0,936	0,654	0,725
33	0,985	0,868	0,952
36	1,000	0,999	1,000

©2017 Universidad Simón Bolívar

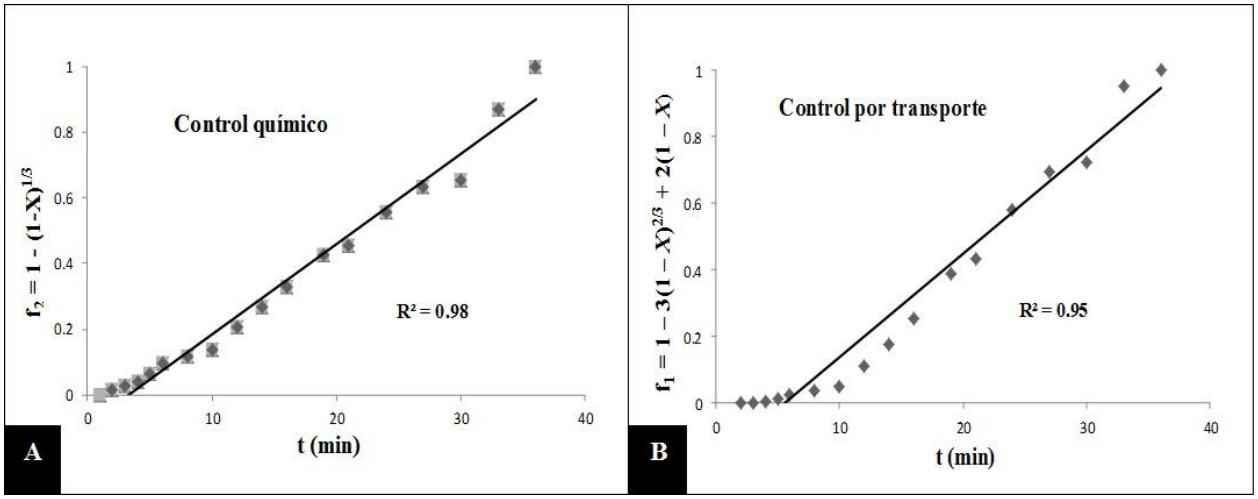


Figura 9. Aplicación de los modelos A) control químico y B) control por transporte para la descomposición de la jarosita de talio, en medio NaOH 0.01 M, 30 °C, 38 µm de tamaño y 650 rpm.

4. CONCLUSIONES

Se logró sintetizar la jarosita de talio. El precipitado obtenido está formado por partículas semiesféricas, constituidas por cristales de tipo romboédrico y de un tamaño mayoritario de 38 a 44 µm.

Se determinó la fórmula experimental de la jarosita de talio sintética de acuerdo a la caracterización presentada,: $[Tl_{0.86}\ (H_3O)_{0.14}\ Fe_{3.11}\ (SO_4)_{2.11}\ (OH)_{6.11}(H_2O)_{0.44}]$, con una densidad resultante de 3.56 g/cm^3.

De acuerdo a los resultados de la naturaleza de la reacción de descomposición en medio NaOH, la curva de descomposición presenta un periodo de inducción, en donde los iones azufre y talio se mantiene en niveles insignificantes, seguido del periodo de conversión progresiva en el cual la concentración del S y Tl aumenta súbitamente lo cual indica que se lleva a cabo la difusión de estos iones del núcleo sin reaccionar hacia la solución y la formación de subproductos sólidos amorfos. Finalmente alcanzando la zona de estabilización, donde la concentración del S y Tl se mantienen constante lo que indica que la reacción de descomposición ha concluido.

Se estableció que el modelo cinético modelo de núcleo que se encoge sin reaccionar es el que mejor describe el proceso de descomposición de la jarosita de talio en medio alcalino.

Así mismo se determinó la etapa controlante con los datos experimentales de la concentración de los iones azufre en solución, indicando que la velocidad de la reacción después del periodo inducción está determinada por etapa de reacción química. Por lo tanto, para estudios posteriores de cinética química sobre la de descomposición de la jarosita de talio en medio NaOH es recomendable utilizar dicho modelo.

Los resultados presentes en este trabajo indican la presencia del talio en solución durante la descomposición de la jarosita de talio en el medio NaOH, resultando de gran importancia ambiental la movilidad de este tipo de elementos bajo estas condiciones. Por lo que estos resultados serán útiles en estudios de cinética química de descomposición alcalina, que permitirán determinar la velocidad de descomposición de este tipo de compuestos de jarosita, dando la posibilidad minimizar esta reacción o inhibirla y disminuir la biodisponibilidad del Tl en el ambiental.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo y al Instituto Politécnico Nacional por todas las facilidades otorgadas para la realización de este trabajo. Se reconoce también el valioso tiempo y asistencia técnica de José Manuel Martínez y Rosalina Tovar del Insituto de Metalurgia de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

6. REFERENCIAS

[1]. Cheam V. Thallium contamination of water in Canada. Water Qual Res J. Can. 2001; 36(4): 851-77.

[2]. John Peter A, Viraraghavan T. Thallium: a review of public health and environmental concerns.

©2017 Universidad Simón Bolívar

Environment International. 2005; 31: 493– 501.

[3]. Dutrizac, J. The Behavior of Thallium during Jarosite Precipitation. Metallurgical and Materials Transactions B. 1997; 28B: 765-776.

[4]. Dutrizac J, Chen S, Beauchemin, S. The behaviour of thallium (III) during jarosite precipitation. Hydrometallurgy. 2005; 79: 138– 153.

[5]. Dutrizac J, Kaiman S. Rubidium jarosite and thallium jarosite-new synthetic jarosite-type compounds and their strutures. Hidrometallurgy. 1975; 1: 51-59.

[6]. Patiño F, Flores M, Reyes I, Reyes M, Hernández J, Rivera I, Juárez J. Alkaline decomposition of synthetic jarosite with arsenic. Geochemical Transactions. 2013; 14:2.

[7]. Patiño F, Arenas A, Rivera I, Córdoba D, Hernández L, Salinas E. Descomposición de plumbojarosita argentífera en medio CaO. Revista de la Sociedad Química de México. 2002; 1(46): 67-72.

[8]. Patiño F, Roca A, Reyes M, Cruells M, Rivera I, Hernández L. Kinetic modeling of the alkaline decomposition and cyanidation of arjentojarosite. J. Mex. Chem. Soc. 2010; 54(4): 216-222.

[9]. Patiño F, Reyes I, Rivera I, Reyes M, Hernández J, Pérez M. Decomposition kinetics of the argentian lead jarosite in NaOH media. J. Mex. Chem. Soc. 2011; 55(4): 208-213.

[10]. Roca A, Patiño F, Rivera I, Hernández L, Pérez M, Salinas E, Reyes M. Decomposition and cyanidation kinetics of the argentian ammonium jarosite in NaOH media. J. Mex. Chem. Soc. 2007; 51(2): 47-54.

[11]. Patiño F, Reyes I, Flores M, Pandiyan T, Roca A, Reyes M, Hernández J. Kinetic modeling and experimental design of the sodium arsenojarosite decomposition in alkaline media: Implications. Hydrometallurgy. 2013; 137: 115–125.

[12]. Reyes I, Patiño F, Rivera I, Flores M, Reyes M, Hernández J. Alkaline Reactivity of Arsenical Natrojarosite. J. Braz. Chem. Soc. 2011; 22 (12): 2260-2267.

[13]. Levenspiel O. Ingeniería de las reacciones químicas, 3a Ed. México: Limusa Wiley, 2013, p. 566-588.

©2017 Universidad Simón Bolívar