

---

## Oxidación de jales ricos en pirita en un reactor a escala de banco

M. R. González-Sandoval\*, S. A. Sánchez-Tovar, C. Márquez-Herrera, L.G. Lizárraga-Mendiola, M. C. Durán-Domínguez-de-Bazúa

Programa de Ingeniería Química y Química Ambiental, Facultad de Química, UNAM. Ciudad Universitaria, México, D.F.

Recibido 08 mayo 2007, revisado 22 septiembre 2007, aceptado 17 noviembre 2007

---

*Pyrite-rich tailings oxidation in a bench scale reactor*

### Abstract

The mining industry is a relevant economical activity in Mexico. However, it is also one of the industries that generate more wastes. Tailings (“jales” in Spanish from the aztec term “xalli”, fine sands) figure among them. Mexican standards define tailings as “solid wastes generated in the primary operations of separation and concentration of minerals” and tailings pond or dam, the deposits where they are disposed of, as “engineering constructions for the storage and final disposal of the tailings, which are built and operated simultaneously”. In the present study, essays to simulate the filling of a tailings pond or dam were performed. The follow up parameters used were taken from a previous study in which it was found that long periods of drought followed by strong precipitations, favor the oxidation of the pyrite in the tailings. The objective of the present research was to determine the effect of these conditions in the leachates characteristics that could be generated. During the tests, the maximum allowed limits for metals stated in Mexican standards where not exceeded and the values of pH and iron concentration were similar to the data analyzed from the tailings pond water samples and the humidity cell tests.

*Key Words:* Tailings, pyrite, acid mine drainage or leachates, bench scale reactor

### Resumen

La minería tiene un papel preponderante en la economía de México, sin embargo, es también una de las industrias que más generan residuos. Entre ellos destacan los jales (del náhuatl “xalli”, arenas finas). La normatividad mexicana define “jales” como “residuos sólidos generados en las operaciones primarias de separación y concentración de minerales” y a los depósitos donde se desechan, llamados “presas de jales” como “obras de ingeniería para el almacenamiento o disposición final de los jales, cuya construcción y operación ocurren simultáneamente”. En el presente estudio se realizaron ensayos en un reactor a escala de banco para simular el llenado de una presa de jales ricos en pirita. Los parámetros de operación fueron los utilizados en celdas de humedad de un estudio previo en el que se determinó que un periodo prolongado de sequía seguido de precipitaciones fuertes, favorece la oxidación de la pirita. El objetivo de la presente investigación fue determinar el efecto de estas condiciones en las características de los lixiviados que pudieran generarse. Se encontró que, durante estos ensayos, no se sobrepasan los límites máximos permisibles de metales establecidas por la normatividad para residuos peligrosos y que hay reproducibilidad en cuanto a la evolución de pH y concentraciones de hierro en comparación con el agua muestreada en la presa de jales y de las pruebas en celdas de humedad.

*Palabras Clave:* Jales o colas, pirita, drenajes o lixiviados ácidos de mina, reactor a escala de banco

---

### Introducción

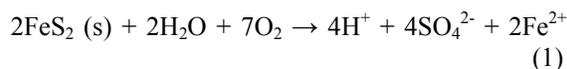
La norma oficial mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003 que establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como las

---

\* Autor de correspondencia  
E-mail: cuquisgast@yahoo.com.mx

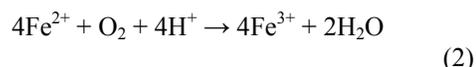
especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y postoperación de las presas de jales, define “jales” como “residuos sólidos generados en las operaciones primarias de separación y concentración de minerales” y “presa de jales” como “obra de ingeniería para el almacenamiento o disposición final de los jales, cuya construcción y operación ocurren simultáneamente”. Uno de los problemas ambientales que pueden generar estos residuos se debe a la presencia de sulfuro ferroso, FeS<sub>2</sub>, conocido como pirita. La oxidación de los jales que contienen pirita, ocurre lentamente, de manera natural en presencia de oxígeno y agua, produciendo ácido sulfúrico y sulfato férrico.

Para desarrollar la presente investigación se toma como caso de estudio el análisis del jal de una mina productora de zinc, cobre y plomo (como sulfuros) que se encuentra en operación desde 1994 y que, por su alta concentración de pirita (alrededor del 50 por ciento) y ausencia práctica de carbonatos que neutralicen la acidez, podría estar generando drenajes ácidos de mina con el consecuente riesgo para el entorno, especialmente de contaminación de las corrientes de agua subterráneas y ríos de la zona. Las principales reacciones de oxidación de la pirita son las siguientes (Bullock y Bell, 1994; Younger et al., 2002):

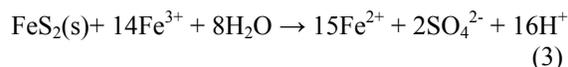


En esta reacción, el azufre se oxida produciendo iones de hidronio y sulfato, los productos de disociación del ácido sulfúrico en solución y se encuentra el ión Fe<sup>2+</sup> libre en solución lo que permite que siga reaccionando. Por otra parte, existe evidencia de que en esta etapa, la catálisis microbiana puede incrementar entre 25 y 34 veces la rapidez de la reacción (Younger et al., 2002).

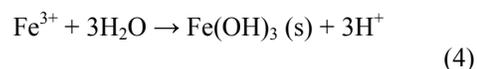
La oxidación del ión ferroso a ión férrico ocurre más lentamente a valores más bajos de pH:



Si el ión férrico producido está en contacto con la pirita, puede ocurrir la siguiente reacción de disolución de la pirita:



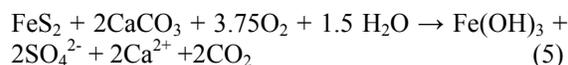
Esta reacción genera más ácido. La disolución de la pirita por el ión férrico, en conjunción con la oxidación del ión ferroso constituye un ciclo de disolución de la pirita. El ión férrico precipita como hidróxido de hierro como se indica en la siguiente reacción:



Debido a la relativa insolubilidad del Fe<sup>3+</sup>, la mayor parte del Fe en solución a valores de pH mayores que 3.5 está presente como Fe<sup>2+</sup>. A valores de pH menores a 3 (el valor exacto depende del contenido de hierro y sulfato), pueden presentarse mayores cantidades de Fe<sup>3+</sup> (Rose y Cravotta, 1998).

La rapidez de oxidación de la pirita también se incrementa conforme aumenta la temperatura, lo que ocurre en la superficie de las presas de jales durante los días soleados, aunque también se ve afectada por la estructura cristalina de la pirita, por ejemplo, la marcasita y la pirita framboidal que se oxidan rápidamente mientras que la pirita cristalina que se oxida lentamente. Tanto el ión férrico como las bacterias actúan como catalizadores de las reacciones de oxidación jugando un rol significativo en la cinética de oxidación (Belzile et al., 2004).

Un factor vital para el amortiguamiento de la acidez generada es la presencia de minerales neutralizantes en los mismos residuos. El carbonato de calcio es considerado el más importante, su reacción de neutralización es la siguiente:



Los métodos utilizados para predecir el potencial de generación de estos lixiviados ácidos se clasifican en estáticos y cinéticos. En las pruebas estáticas se hace la comparación entre el potencial máximo de producción de ácido (PA) de los sulfuros y el potencial máximo de neutralización (PN) debido a los minerales alcalinos para obtener el potencial neto de neutralización (PNN). En el caso de las muestras utilizadas en el reactor, su potencial neto de neutralización es de 0.015 kg de CaCO<sub>3</sub> Ton<sup>-1</sup> de jal. Dado que el límite para considerar a los

residuos mineros como potenciales generadores de acidez es de 1.2 o menor, los jales utilizados en este estudio se consideran como potenciales generadores de acidez.

Por otra parte, las pruebas cinéticas se distinguen de las estáticas en que pretenden emular las reacciones de oxidación natural en el ambiente en que se encuentra el residuo, especialmente el lixiviado de metales pesados al ambiente (aguas subterráneas y/o suelos) y los procesos de producción y consumo de ácido en el ambiente natural, por lo que proporciona datos sobre la rapidez de lixiviación de metales, generación de ácido y neutralización del ácido de una muestra seleccionada. Una de las pruebas cinéticas más comunes son las pruebas de celdas de humedad. En estas pruebas se coloca una muestra del residuo en un recipiente cerrado y se le hace circular aire por la parte inferior, atravesando el jale para acelerar así la oxidación de los jales. En las pruebas más normalizadas (Sobek, 1978; ASTM, 1996) se hace circular por tres días aire seco y en los tres subsiguientes aire humidificado con agua desionizada. Al séptimo día se adiciona sobre el jale una cantidad de agua equivalente al 100 o 50% de la masa de jale y se deja reposar una hora. Posteriormente, se recolecta el lixiviado y se determinan el valor de pH, conductividad eléctrica, sulfatos, metales y potencial redox.

En el estudio precedente a esta investigación, González-Sandoval (2006) propuso un sistema de celdas en las que, en vez de utilizar aire humidificado, se adicionarán distintos volúmenes de agua, durante un número variable de días en ciclos de dos semanas en lugar de una, simulando así el periodo de lluvias anual y lixiviando en el último día del ciclo. De esta manera se puede hacer el proceso de "intemperización" acelerada más semejante a las condiciones reales de campo. Bajo este esquema se encontró que, independientemente del volumen de agua adicionado, lo que más acelera el proceso de oxidación son los periodos prolongados de sequía ya que de esta manera se facilita la difusión del oxígeno en el jale que, de acuerdo con las reacciones presentadas, es el reactivo limitante en la oxidación de la pirita a sulfato ferroso.

Actualmente, la presa de jales en estudio contiene alrededor de tres millones de toneladas de jale y está prácticamente al límite de su capacidad por lo que ya se encuentra en construcción una segunda presa que estará en funciones a principios de 2008. Por

esta razón es de suma importancia el conocimiento del comportamiento de la presa existente a fin de tomar las consideraciones necesarias en la operación de la nueva presa y realizar el cierre adecuado de la presa actual.

## Material y métodos

### *Muestreo*

La presa de jales muestreada pertenece a una mina localizada en el Estado de México, aproximadamente 120 km al noroeste de la Ciudad de México. La mezcla sólido-líquido (jale) se va distribuyendo homogéneamente sobre la superficie de la presa buscando mantener un ligero declive hacia una zona, que siempre permanece inundada aunque la extensión del área cubierta varía de acuerdo a la posición de la tubería de descarga del jale y la evaporación o precipitaciones sobre la presa aunque siempre alrededor de nivel mínimo donde se localiza la tubería de salida de agua de la presa. En esta zona se recupera el agua, que es enviada nuevamente al proceso sin ningún tratamiento. Se colectaron muestras de jales en la zona de descarga a la presa y de agua en la zona inundada de la presa en visitas realizadas abril, agosto y septiembre de 2005 y enero de 2006. Los muestreos se realizaron considerando cubrir los periodos anterior a la temporada de lluvias, durante la temporada de lluvias y posteriores a la temporada de lluvias para apreciar el efecto de los cambios climáticos sobre la calidad del agua de la presa. En las muestras de agua se midieron "in situ": Temperatura, pH y conductividad eléctrica usando un equipo de campo Corning Modelo Checkmate II, de acuerdo con el instructivo del fabricante (Corning, 1999). Las muestras de agua se acidificaron con ácido nítrico para el posterior análisis de metales totales y sulfatos. Por otra parte, las muestras de jale se mantuvieron inundadas a 4°C antes de su utilización.

### *Análisis de aguas y jales*

Las muestras de agua fueron digeridas adaptando las metodologías de la EPA para digestión ácida (EPA, 1992) para su posterior análisis multi-elemental ICP-OES en el Departamento de Ingeniería Química Metalúrgica de la Facultad de Química de la UNAM. Se cuantificaron los sulfatos por turbidimetría conforme a lo indicado en la norma NOM-141-SEMARNAT-2003 (DOF, 2004), basada en el método EPA 9038 de cuantificación de

sulfatos por turbidimetría. En el caso de los jales se determinó su composición mineralógica del jal mediante un análisis semi-cuantitativo de difracción de rayos X (DRX), en la Unidad de Servicios de Apoyo a la Investigación de la Facultad de Química de la UNAM. También se digirieron muestras adaptando las metodologías de la EPA de digestión total en microondas para suelos, sedimentos y lodos (EPA, 1991) y sus concentraciones de metales analizadas mediante espectrometría de emisión óptica inductivamente acoplada a plasma (ICP-OES, inductively coupled plasma-optical emission spectrometry, por sus siglas en inglés) en el Departamento de Ingeniería Química Metalúrgica de la Facultad de Química de la UNAM (Perkin-Elmer, 2002). Se analizaron también metales y sulfatos en los laboratorios analíticos de la empresa minera cooperante.

#### *Simulación de la presa de jales a escala de banco*

Para el desarrollo de las pruebas es a escala de banco se consideró, además de los parámetros utilizados en las celdas de humedad, el proceso de llenado de la presa. La presa se va cubriendo por zonas, colocando la tubería de descarga a lo largo de la orilla sur de la presa hasta volver al área inicial aproximadamente un mes después, manteniendo siempre una pendiente para que el agua decantada se concentre en la parte más baja de la presa. Por esta razón se consideró la adición de capas secuenciales de jal en el reactor pero manteniendo las variables de operación de las celdas de humedad. El reactor utilizado para la simulación del llenado de la presa de jales está fabricado en acero inoxidable 316 y mide 1.2 x 0.5 x 0.6 m. Tiene un soporte de malla de acero inoxidable recubierto de algodón para retener el jal y al mismo tiempo permitir la circulación del lixiviado el cual es recolectado por el fondo. Se consideró una primera capa de 5 cm de espesor de la muestra de jal fresco tomada en la primera visita. Sobre esta capa se colocó una muestra subsecuente de jal de la segunda visita y, finalmente, se adicionó una tercera capa de muestra de jal que se tomó en la última visita. El flujo de aire que se hizo circular sobre la superficie del jal fue de aproximadamente 12 l min<sup>-1</sup>. El volumen de agua de "lluvia" rociado sobre el jal correspondía, conforme al escalamiento de las celdas de humedad, al 5% de la masa total del jal después de adicionar las tres capas de jal (4 kg). Se realizaron dos "lixiviaciones" por capa de

jal utilizando un volumen de agua de 80 l, aproximadamente 80 kg de agua equivalentes a la misma masa del jal total. El reactor se mantuvo operando a temperatura ambiente durante 12 semanas, de enero a marzo de 2006. En los lixiviados se analizaron potencial de hidrógeno, conductividad, potencial redox y concentración de sulfatos por turbidimetría y metales totales por ICP-OES, obteniéndose 6 muestras en un total de 12 semanas de operación. Se compararon los resultados con la caracterización de muestras de agua de la presa y los resultados de las pruebas en celdas de humedad.

#### **Resultados y discusión**

##### *Análisis de aguas y jales*

En la tabla 1 se presentan los resultados promedio de los análisis de las muestras de agua recolectadas. De estos resultados se pueden hacer las siguientes observaciones:

Hay un descenso en el pH del agua en la presa entre 2 y 5.8, comparado con el pH de descarga del cual está entre 7 y 8, como se registró para el decantado del jal de las muestras tomadas en agosto de 2005 (7.4) y en enero de 2006 (6.8). Los valores más ácidos se presentan en la temporada de estiaje y los menos ácidos en la época de lluvias, como era de esperarse por la dilución del agua de lluvia.

Las conductividades eléctricas en los diferentes puntos de muestreo se encuentran en un intervalo entre 4300 y 6300  $\mu\text{S cm}^{-1}$  observándose una ligera disminución en el muestreo en temporada de lluvias debida también a la dilución del agua de lluvia. Como referencia, estas conductividades eléctricas corresponden aproximadamente a 40 a 50 veces la recomendada para el agua potable de hasta 100  $\mu\text{S cm}^{-1}$  (Bolaños et al., 2006).

Las concentraciones de sulfatos son proporcionales a las conductividades y sus valores se encuentran entre 2100 y 4200 ppm ( $\text{mg l}^{-1}$ ).

En lo que se refiere a las concentraciones de metales, con base en los límites máximos permisibles para los constituyentes tóxicos en el extracto PECT de la tabla 2 de la NOM-052-SEMARNAT-2005 (DOF, 2006), en ninguna de las muestras se exceden los límites máximos permisibles indicados. Por esta razón se presentan únicamente las concentraciones de hierro y zinc, correspondientes a los sulfuros más abundantes además de que, en el caso del zinc, su presencia se

Tabla 1. Parámetros determinados en muestras de agua de la presa de jales y de referencia.  
*González-Sandoval et al. / Revista Latinoamericana de Recursos Naturales, 4 (2): 130-138, 2008*

Descripción de la muestra	Mes de muestreo	T (°C)	pH	C.E. ( $\mu\text{Scm}^{-1}$ )	Sulfatos (ppm)	Fe (ppm)	Zn (ppm)
Agua presa	Abril 05	27	2	6113	3178	3.7	5.85
Agua presa	Agosto 05	29.63	5.03	5423	2848	2.3	15.95
Agua presa	Septiembre 05	25.70	4.66	4340	2151	5.3	14.9
Agua presa	Enero 06	24.70	5.82	6280	4170	3.1	35.1
Decantado de jal	Agosto 05	20.80	7.40	4770	ND	0.4	1.8
Decantado de jal	Enero 06	21.50	6.80	6260	ND	32.5	24.9
Agua de manantial (referencia)	Septiembre 05	23.80	6.75	185	<30	<LD	0.1
Agua de manantial	Enero 06	24.20	7.19	146	<20	4.0	5.2

debe también a la adición de sulfato de zinc como parte del proceso de flotación.

En la misma tabla 1 se incluyen como valores de referencia los mismo parámetros determinados en los decantados del jal de las muestras tomadas en agosto de 2005 y enero de 2006 así como de muestras de agua de un manantial que se encuentra en la propiedad de la mina y de donde se toma agua de reposición para la flotación.

Por otra parte, el aspecto de la presa en las partes donde el jal ya está reseco es de una coloración blanquecina debida a la precipitación de sulfatos, principalmente. Estos fueron separados en el laboratorio por evaporación del agua y analizados por difracción de rayos X (USAI-FQ-UNAM). Se determinó que se componen principalmente de sulfato de calcio dihidratado, conocido también como yeso, que se debe a la adición de cal para control de pH del proceso. En la tabla 2 se indican las concentraciones de metales en las muestras de jal utilizadas, sobresaliendo la alta concentración de hierro, 38% en promedio, que se encuentra en su mayor parte como piritita y que, de acuerdo con los estudios mineralógicos es el mineral mayoritario que conforma los jales (de 70 a 90%), así como también en la moscovita ((K,Na)(Al,Mg,Fe)(Si<sub>3</sub>Al<sub>10</sub>O<sub>9</sub>)O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub>, 5%) y la clinoclora (Mg,Fe)6(Si,Al)4O<sub>10</sub>(OH)<sub>8</sub>, 5%). Por su parte el zinc se encuentra como esfalerita, sulfuro de zinc, que compone entre el 3 y 5% de los jales de acuerdo con los análisis de rayos X.

#### *Simulación de la presa de jales a escala de banco*

Los parámetros de seguimiento de los reactores, se reportan de manera análoga a los análisis de agua en la tabla 2 y se grafican en las Figs. 1 y 2. A continuación se analizan dichos resultados: Se presentó un descenso prácticamente escalonado

y gradual del valor del pH partiendo de 6.12 hasta alcanzar un mínimo en la semana 10, de 3.8, repuntando ligeramente a 4.1 en la semana 12. Coincide este punto también con la mayor producción de iones hidronio, estimados a partir de la aproximación de que el descenso de pH se debe a la producción de ácido sulfúrico, que es un ácido fuerte y tomando el volumen recolectado de lixiviados. El descenso de pH se asemeja a los presentados en la presa de jales y en la celda a partir de al cual se realizó el escalamiento, lo que indica que, a pesar de la ausencia de carbonatos en los jales, estos presentan una débil capacidad amortiguadora, debida a otros minerales como la moscovita y la clinoclora que contienen grupos OH<sup>-</sup> aun cuando su liberación no están inmediata como en el caso de los carbonatos. En la Fig. 3 se presentan los valores registrados de pH y conductividad para la celda de humedad de referencia.

En contraste, las conductividades eléctricas son menores a las registradas en las celdas de humedad y en el agua de la presa las concentraciones de sulfatos son proporcionales a los valores de conductividad eléctrica reportados, en una fracción que oscila entre el 45 y el 70% del valor de la conductividad. Usando este parámetro que se puede estimar el contenido de sulfatos en función de la conductividad e incluso, la concentración de metales.

En cuanto a las concentraciones de metales, el zinc se presenta en mayor abundancia (entre 50 y 200ppm), obteniéndose la concentración máxima en el primer lixiviado, lo que indica que ya había presente una gran cantidad de sulfuro de zinc oxidado en el jal original. En las muestras subsecuentes, se presume que se debe a la oxidación del sulfuro de zinc, favorecida bajo las condiciones experimentales.

Tabla 2. Composición elemental y concentración de sulfatos en los jales.

Fecha de muestreo	Abril 05	Agosto 05	Enero 06	Conc. Promedio	Desv. estándar (s)	Coef. variación de conc. (CV, %)
No. Loc. Plano	E	H	I			
Elemento (unidades)	Concentración elemental					
Fe (%)	36.0	38.8	40.0	38.3	2.05	5.36
Zn (%)	0.8	2.2	1.8	1.6	0.72	45.07
Pb (%)	0.4	0.4	0.3	0.4	0.06	15.75
Cu (ppm)	944.0	2300.0	2000.0	1748.0	712.26	40.75
Ag (g/ton)	71.3	90.5	<LD	53.9	13.58	25.17
As (%)	0.4	0.3	0.3	0.3	0.06	17.32
B (ppm)	89.0	206.0	ND	98.3	82.73	84.13
Ba (ppm)	65.0	21.0	70.1	52.0	27.00	51.88
Be (ppm)	NC	NC	ND	0.0	N/A	N/A
Ca (%)	1.0	0.4	0.6	0.7	0.31	45.83
Cd (ppm)	80.0	167.0	147.0	131.3	45.57	34.70
Co (ppm)	8.0	<LD	<LD	2.7	ND	ND
Cr (ppm)	4.0	<LD	3.5	2.5	0.35	14.14
Ga (ppm)	114.0	114.0	ND	76.0	0.00	0.00
Li (ppm)	15.0	3.0	ND	6.0	8.49	141.42
Mg (%)	0.6	0.4	0.3	0.4	0.15	35.25
Mn (ppm)	406.0	257.0	298.0	320.3	76.97	24.03
Mo (ppm)	3.0	<LD	<LD	1.0	ND	ND
Ni (ppm)	17.0	5.0	<LD	7.3	8.49	115.71
Sb (ppm)	201.0	294.0	150.0	215.0	73.01	33.96
Si (%)	5.4	3.4	ND	2.9	1.41	48.21
Sr (ppm)	31.0	17.0	34.0	27.3	9.07	33.20
Ti (ppm)	151.0	95.0	98.0	114.7	31.50	27.47
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (%)	1.7	0.6	0.6	1.0	0.61	63.16

Aún cuando éste no genera ácido sulfúrico, sí contribuye en el aumento de la conductividad. Las concentraciones de hierro en ningún caso exceden las 10 ppm, tal como ocurre en la presa de jales, debido principalmente a su reprecipitación y en el caso de los demás metales determinados no se exceden tampoco en ningún caso los límites señalados en la normatividad mexicana. Las concentraciones de sulfatos son proporcionales a las conductividades eléctricas por lo que la conductividad es un excelente parámetro de seguimiento de la oxidación de los sulfuros de zinc y hierro.

Tabla 3. Parámetros analizados en reactor de banco

Consecutivo de lixiviado	1	2	3	4	5	6
Semana	2	4	6	8	10	12
Capa de jal	1	1	2	2	3	3
Volumen (L)	46	45	53.5	59	65	61
T (°C)	22.7	18.1	18.3	20.8	24.4	20.1
Valor de pH	6.12	6.07	5.33	4.8	3.76	4.1
moles H <sup>+</sup>	3.489E-05	3.830E-05	2.502E-04	9.351E-04	1.130E-02	4.845E-03
C. E. (μS/cm)	2770	1538	1679	1256	2040	1279
Sulfatos (ppm)	2619	747	1045	607	981	576
Fe (ppm)	1.436	2.086	6.689	0.949	4.043	3.584
Zn (ppm)	188.112	76.204	75.786	60.008	68.001	39.542

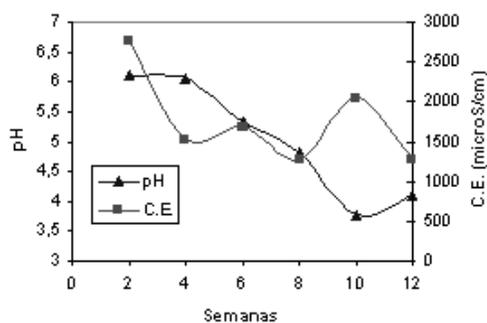


Figura 1. Registro de los valores de pH y la conductividad como función del tiempo en el reactor a escala de banco.

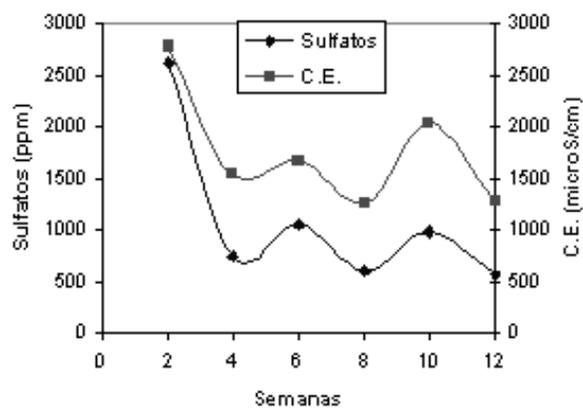


Figura 2. Comparación de la concentración de sulfatos con la conductividad eléctrica en los lixiviados del reactor .

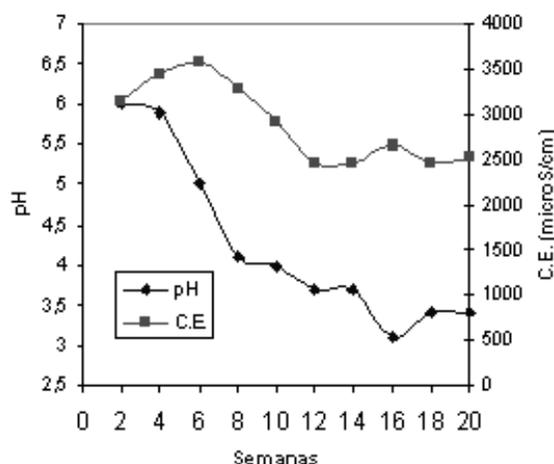


Figura 3. Registro de los valores de pH y la conductividad como función del tiempo en el reactor a escala de banco.

## Conclusiones

La exposición de los jales de pirita al oxígeno del aire y el agua ocasionan su descomposición a ácido sulfúrico y sulfato férrico que precipita como oxihidróxidos de hierro. Las concentraciones de hierro disuelto encontradas, tanto en los ensayos realizados como en aguas de la presa, son muy bajas en comparación con las concentraciones de sulfatos debido a su precipitación como oxihidróxido. Este fenómeno contribuye a la adsorción de otros cationes de elementos potencialmente tóxicos, por lo que, a pesar de la presencia de elementos potenciales tóxicos en los jales, sus concentraciones son muy bajas en los lixiviados, lo que podría representar una forma de atenuación natural disminuyendo los riesgos al ambiente en caso de que estos lixiviados ácidos se liberaran en cuerpos de agua circundantes, siempre y cuando el pH se mantenga en el intervalo de valores en este estudio. Es necesario continuar los estudios de intemperización a más largo plazo para verificar que así sea.

## Agradecimientos

Los autores agradecen las facilidades prestadas por la empresa cooperante para la realización de este proyecto, al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por las becas de posgrado de Ma. Del Refugio González-Sandoval y Liliana Lizárraga-Mendiola y al Proyecto IN-103403 por el financiamiento parcial para esta investigación

(PAPIIT-DGAPA-UNAM)

## Bibliografía

- ASTM. 1996. ASTM Designation: D 5744-96-Standard Test Method for Accelerated Weathering of Solid Materials Using a Modified Humidity Cell. West Conshohocken, PA, EEUU.
- En Mills, C. 2005. Kinetoc test work procedures. Dirección electrónica: <http://technology.infomine.com/enviromine/ard/Kinetic%20Tests/kinetic%20Procedures.htm#ASTM%201996>
- Belzile, N., Chen, Yu-Wei, C., Mei-Fang, C., Yuerong, L. 2004. A review on pyrrhotite oxidation. Journal of Geochemical Exploration Vol. 84. P. 65-75
- Bolaños-Guillén, A., Pérez-López, M., Garza-Cano, E. 2006. Determinación de la conductividad eléctrica. Tutorial de análisis de agua. Educación asistida por computadora. Universidad Autónoma de Tamaulipas. Dirección: <http://www.avantel.net/~arbolag/conducti.htm>
- Bullock, S.E.T., Bell, F.G. 1994. Ground and surface water pollution at a tin mine in Transvaal, South Africa. Proceedings of the First International Congress on Environmental Geotechnics. Edmonton, Alberta, Canadá
- Corning. 1999. Science Products Division. Corning Incorporated, Nueva York. EEUU
- DOF. 2004. Norma Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003, que establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción y operación y postoperación de presas de jales. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D.F. México
- DOF. 2006. Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005, Que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos 4 peligrosos. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D.F. México
- EPA. 1991. Method 3051. Microwave Assisted Acid Digestion Of Sediments, Sludges, Soils, and Oils. Revision 0. Environmental Protection Agency. Washington, DC. EEUU

- EPA. 1992. Method 3005A. Acid Digestion Of Waters for Total Recoverable or Dissolved Metals for Analysis by FLAA or ICP Spectroscopy. Revision 1. Environmental Protection Agency. Washington, DC. EEUU
- González-Sandoval, M.R. 2006. Generación de lixiviados ácidos de jales ricos en pirita. Tesis de maestría en ingeniería ambiental (Sustancias y residuos peligrosos). UNAM, PMyDI. México D.F. México
- Perkin Elmer. 2002. ICP-Optical Emisión Spectrometer mod. Optima 4300 DV
- Rose, A. W., Cravotta, C. A. 1998. III. Geochemistry of Coal Mine Drainage. En Coal Mine Drainage Prediction and Pollution Prevention in Pennsylvania. Cap. 1. Pennsylvania Department of Environmental Protection. Dirección:  
<https://www.dep.state.pa.us/dep/deputate/minres/districts/CM DP/chap01.html>
- Sobek, A.A., Schuller, W.A., Freeman, J.R. Smith, R.M. 1978. Field and Laboratory Methods Applicable to Overburden and Minesoils. EPA 600/2-78-054. En Environmental Protection Agency, 1994. Acid Mine Drainage Prediction. Office of Solid Waste. Special Waste Branch. Washington, DC, 20460. EEUU. P. 19
- Younger, P. L., Banwart, S. A., Hedin, R.S. 2002. Mine Water. Hydrology, Pollution, Remediation. Kluwer Academic Publishers. Bodmin, Cornwall, Reino Unido. P. 70