

# TRATAMIENTO PIRO/HIDROMETALÚRGICO DE MINERALES DE ALTO CONTENIDO DE MANGANESO

Ing. Jhovan H. Usnayo Usnayo  
Dr. Ing. Gerardo Zamora E.  
Ing. Carlos Velasco Hurtado

## RESUMEN

*La actual crisis de la minería boliviana, que afronta bajas cotizaciones y altos costos de producción en los minerales tradicionalmente producidos en el país, ha llevado a la necesidad de investigar el tratamiento de otros minerales no tradicionales, tal es el caso de los minerales de manganeso (pirolusita).*

*El objetivo del trabajo de investigación, es el de estudiar el tratamiento metalúrgico de minerales con alto contenido de manganeso y establecer la posible aplicación del carácter ácido de las aguas de mina como agente de lixiviación.*

*El tratamiento propuesto, consta de en una primera etapa de reducción carbotérmica de la pirolusita ( $MnO_2$ ) a manganosita ( $MnO$ ), y de una segunda etapa en la que el producto de la reducción es sometido a una lixiviación ácida.*

*En la etapa de reducción carbotérmica, se ha establecido que las condiciones que permiten la total reducción de la pirolusita son  $900\text{ }^\circ\text{C}$  de temperatura,  $637.5$  micrones de granulometría del mineral, relación de  $C/MnO_2$  de  $1.25$  y un tiempo de residencia de  $2$  horas.*

*La recuperación de manganeso del producto de la reducción carbotérmica, en la etapa de lixiviación con  $H_2SO_4$ , ha sido del  $85\%$  para una relación de  $1.5$  respecto al estequiométrico y  $13.5\%$  sólidos.*

*La aplicación de agua ácida de mina como agente de lixiviación, ha permitido obtener extracciones hasta  $96\%$  bajo las siguientes condiciones de operación;  $10\%$  de porcentaje de sólidos, relación de agua ácida/ $H_2SO_4$  de  $5/1$ , velocidad de agitación de  $600$  rpm y un tiempo de lixiviación de hasta dos horas.*

*El uso de agua ácida de mina reduce sustancialmente el consumo del ácido sulfúrico, y a su vez, se aprovecha un recurso que se considera como contaminante en los sectores de la producción minera.*

## 1. INTRODUCCIÓN

Bolivia es un país tradicionalmente minero, que tiene que extender su actividad hacia la diversificación mediante la explotación de otros metales que podrían considerarse no tradicionales en nuestro medio. Este es el caso del comienzo de la explotación minera del manganeso en varios yacimientos existentes tanto en el oriente como en la zona andina de nuestro país. Esto exige el conocer, además de las características de sus minerales, los procesos adecuados de tratamiento de los mismos con el fin de instalar industrias para la obtención de productos que sean comercializables[1].

La comercialización de minerales de manganeso (pirolusita, psilomelano) se hace interesante cuando estos son casi puros, presentando por tanto tenores de manganeso elevados. Los yacimientos encontrados en nuestro país se caracterizan por ser de dos tipos:

Carrera de Ingeniería Metalúrgica  
Universidad Técnica de Oruro

**Tipo A.** Yacimientos con bajo contenido de manganeso (menor a 20%).

**Tipo B.** Yacimientos con alto contenido de manganeso (mayor a 20%), pero con alto contenido de impurezas. Por lo que su comercialización no es posible.

Estudios realizados con minerales de manganeso Tipo B mediante lixiviación directa en medio ácido, han reportado problemas debido a la formación de precipitados de difícil filtración [2], por lo que se propone la recuperación de manganeso de estos yacimientos mediante un proceso de reducción carbotérmica para obtener MnO, y posteriormente lixiviar el producto en medio ácido en ausencia de un agente oxidante.

En la etapa de lixiviación, se propone además estudiar la aplicación de las aguas ácidas de mina como agentes de lixiviación.

Es conocido que la formación de las aguas ácidas de mina obedece a un proceso natural de oxidación de minerales sulfurados en presencia de oxígeno y agua y que es catalizado por microorganismos del género Thiobacillus. Esta formación está descrita de acuerdo a la siguiente reacción general:



Estas aguas ácidas, denominadas en nuestro medio como “aguas de copajira”, se constituyen hoy en día en una de las principales fuentes de contaminación del medio ambiente en varias regiones mineras de nuestro país, debido a que se caracterizan por presentar una serie de metales pesados tóxicos disueltos y ser fuertemente ácidas [3]. Por tanto, su aplicación en la lixiviación del producto de reducción, permitiría mitigar su efecto potencial de contaminación.

## 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

El carácter fuertemente ácido y la presencia de iones  $\text{Fe}^{2+}$  de las aguas ácidas de mina, permiten pensar en su posible aplicación como agente lixiviante de minerales con alto contenido de manganeso.

Sin embargo, son requeridas concentraciones de  $\text{Fe}^{2+}$  demasiado altas para permitir la disolución de  $\text{MnO}_2$  [2], que producen la formación de productos de difícil filtración. La alternativa es entonces realizar la reducción carbotérmica del  $\text{MnO}_2$  a MnO y luego lixiviar más fácilmente el producto reducido en medio ácido o aplicando las aguas ácidas de mina.

### 2.1. ETAPA PIROMETALÚRGICA

El manganeso presenta cuatro óxidos principales,  $\text{MnO}_2$ ,  $\text{Mn}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Mn}_3\text{O}_4$  y el MnO. La estabilidad de los mismos en condiciones de equilibrio como una función de la temperatura, en un ambiente reductor generado por la adición de carbón en la proporción molar  $\text{MnO}_2 / \text{C}$ , se muestra en la figura 1. En ella se observa que el MnO comienza a formarse a partir de los 200 °C aproximadamente, y llega a ser la fase oxidada mayoritaria a los 600 °C. El otro óxido

que es estable en estas condiciones de calentamiento es el  $\text{Mn}_3\text{O}_4$ , alcanza su máxima estabilidad entre los 300 a 400 °C, y a partir de esta temperatura, comienza a ser reducido parcialmente para formar el MnO. La siguiente reacción global [4] representa el proceso de reducción:



El manganeso también reacciona parcialmente con carbón para formar el carburo de manganeso  $\text{MnC}_2$ , una fase que es muy estable, difícil de atacar químicamente.

La presencia del carburo de manganeso depende fundamentalmente de la cantidad de carbón que se adiciona y de la temperatura; en la figura 2, se muestran las cantidades molares de equilibrio de las especies que se forman en el horno a una determinada temperatura, para un mol de  $\text{MnO}_2$  y para diferentes cantidades de carbón. En dicha figura se observa que el MnO alcanza un máximo para una relación molar de  $\text{MnO}_2 / \text{C}$  entre 0.45 a 0.5; para relaciones mayores, el MnO reacciona con el carbón para formar parcialmente carburo de manganeso de acuerdo a la siguiente reacción:

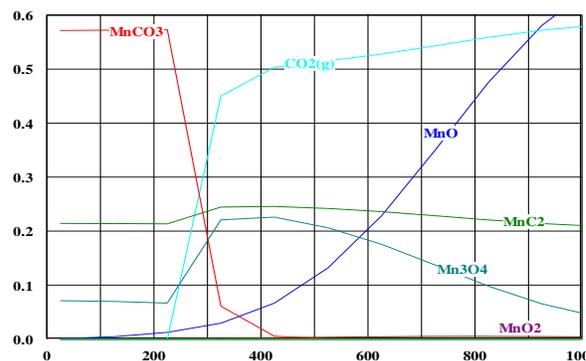


Figura 1. Equilibrio en el sistema Mn-O-C en función de la temperatura [5].

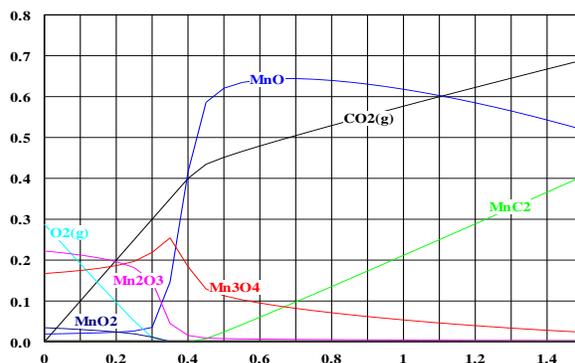


Figura 2. Equilibrio en el sistema Mn-O-C a 900 °C en función de la cantidad de carbón en el sistema [5].

El carbón puede provenir del reductor añadido al horno, o formarse a partir del CO de acuerdo a la ecuación de Boudouard:



esta reacción de descomposición del CO es favorecida a temperaturas menores a 900 °C [6].

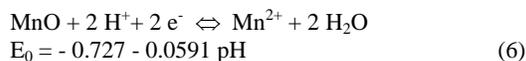
La estabilidad del Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, prácticamente no es afectada por la adición de un exceso de carbón en el sistema.

## 2.2 ETAPA DE LIXIVIACIÓN

El MnO, que se obtiene en el proceso de la reducción con carbón, se lixivia con una solución de ácido sulfúrico de acuerdo a la siguiente reacción:



La reacción iónica de la disolución sería [6]:



La figura 3, muestra que el Mn<sup>2+</sup> es estable en pH ácidos en el sistema Mn – H<sub>2</sub>O. El MnO puede ser disuelto en soluciones ácidas, sin la presencia de un agente oxidante, mientras que el MnO<sub>2</sub>, requiere para su disolución en medio ácido de la presencia de un agente que se oxide y permita la reducción del Mn<sup>4+</sup>.

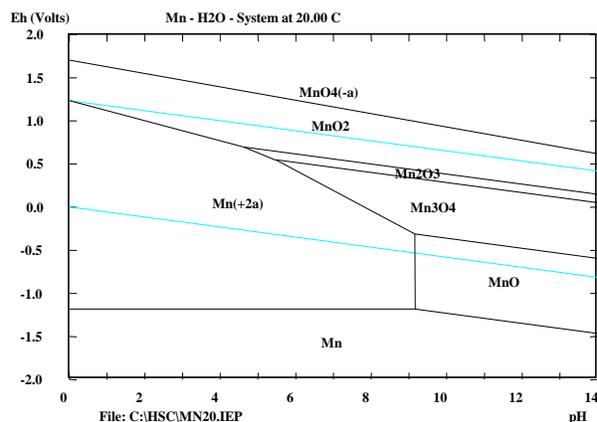


Figura 3. Equilibrio Eh- pH del sistema Mn-H<sub>2</sub>O a 20 °C [7].

## 3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El mineral de manganeso (pirolusita) procede del precámbrico, de la provincia Chiquitos del departamento de Santa Cruz. El análisis químico de este mineral es presentado en la tabla 1.

Para el estudio, se tomó una muestra del agua ácida de la mina San José. La tabla 2, sintetiza la caracterización de la misma.

TABLA 1. Análisis del mineral de manganeso [4].

| ELEMENTO         | PORCENTAJE |
|------------------|------------|
| Mn               | 48.74 %    |
| Fe               | 3.99 %     |
| TiO <sub>2</sub> | 1.05 %     |
| SiO <sub>2</sub> | 2.29 %     |
| Mg               | 0.53 %     |
| Ni               | 0.014 %    |
| As               | 0.055 %    |
| Ca               | 1.95 %     |
| Pb               | 0.42 %     |

TABLA 2. Análisis químico del agua de mina de San José.

| ELEMENTO        | CONCENTRACIÓN, (mg/l) |
|-----------------|-----------------------|
| Na              | 23,900.00             |
| K               | 304.00                |
| Ca              | 185.00                |
| Mg              | 256.00                |
| Mn              | 7.52                  |
| Fe              | 4,800.00              |
| Zn              | 94.90                 |
| Sb              | 8.55                  |
| Cl              | 33,985.00             |
| SO <sub>4</sub> | 12,572.44             |

El carbón vegetal utilizado en la reducción tiene 76% de carbón fijo.

Para las pruebas de tostación, se mezcló el mineral clasificado con el carbón, tomando en cuenta la relación C/MnO<sub>2</sub> estudiada.

La mezcla homogeneizada fue reducida en el horno variando la temperatura y el tiempo de residencia. Una vez reducido el material, se evitó la entrada de aire al reactor para eliminar la posible reoxidación del MnO.

El producto de la reducción fue sometido a una lixiviación ácida con ácido sulfúrico a relaciones estequiométricas, como medio de evaluación de la reducción carbotérmica.

Posteriormente, con los parámetros óptimos de la reducción carbotérmica de la pirolusita, se preparó un lote para su posterior tratamiento, el cual se describe a continuación:

Se preparó la solución variando la relación de volumen de A.A.M./volumen H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. A la solución se añadió el mineral tostado del lote y se agitó el sistema a velocidad constante. Se tomaron medidas de temperatura y pH. Se estudió el efecto de la variación del % sólidos de la solución.

Después del tiempo establecido en los test de lixiviación se filtró la solución, y el queque obtenido fue lavado con una solución ácida. Las soluciones de filtración como los queques se enviaron al laboratorio químico para su análisis químico respectivo.

La figura 4, muestra de manera resumida, las etapas involucradas del proceso propuesto desde la etapa de preparación de la muestra hasta la lixiviación del mineral de manganeso.

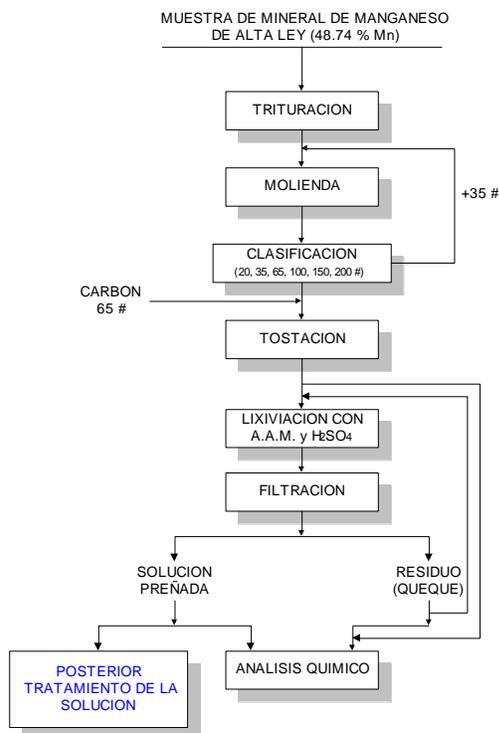


Figura 4. Flujograma general el proceso.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

### 4.1 REDUCCIÓN CARBOTÉRMICA

En las pruebas, se ha hecho uso de diferentes relaciones C/MnO<sub>2</sub> (0.75, 1, 1.25 y 1.5), se ha variado el tamaño de grano (112.5, 181, 318.5 y 318 micrones), el tiempo de residencia en el horno (1 y 2 horas) y la temperatura del horno (700, 800, 900 y 1,000 °C).

En esta serie de pruebas se ha lixiviado el producto de la reducción carbotérmica bajo condiciones estándares, esto para obtener la variable resultante que es la *extracción de manganeso*, con lo cual se han determinado las condiciones más favorables que permiten la mayor extracción.

Las condiciones de lixiviación con ácido sulfúrico fueron: ácido sulfúrico de acuerdo a la relación estequiométrica de la reacción (5) con un 30% en exceso; velocidad de agitación (600 rpm.), solución de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 2.4 M\* y % sólidos 13.5.

#### 4.1.1 EFECTO DE LA TEMPERATURA Y EL TIEMPO DE RESIDENCIA

Es posible deducir el tiempo de residencia que permite una mayor extracción de manganeso, en la etapa posterior de lixiviación, es de dos horas, esto debido a que la tostación reductora en un lapso de tiempo menor (una hora) no llega a completarse y la reacción (2) es parcial. De la representación gráfica de los resultados obtenidos y presentados en la figura 5, se establece que hay un incremen-

to en la extracción cuando la temperatura en la etapa de reducción es incrementada de 700 °C a 900 °C, debido a que la elevación de temperatura favorece para que Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub> se reduzca a MnO, y que la reacción de Boudouard (4) vaya en el sentido de la formación de CO a temperaturas mayores a 900 °C, lo que disminuye la posibilidad de que exista carbón disponible para la formación de carburo de manganeso, y óxidos superiores de manganeso.

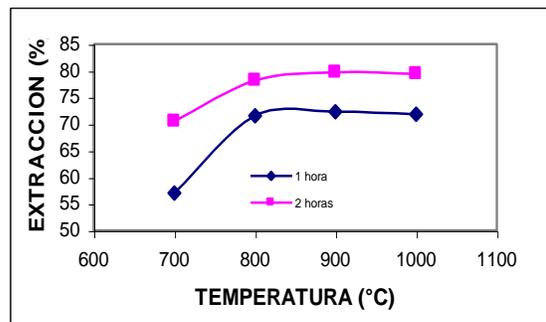


Figura 5. Efecto de la temperatura y el tiempo en la extracción (C/MnO<sub>2</sub> = 1/1, tamaño de grano = 318.5 μm).

#### 4.1.2. EFECTO DEL TAMAÑO DE GRANO Y LA TEMPERATURA.

La figura 6, muestra los resultados del estudio del efecto de la granulometría del mineral en la reducción carbotérmica, llevada a cabo entre 900 a 1,000 °C y seguida de la lixiviación ácida.

De los resultados obtenidos se establece que cuanto más fino es el material en la etapa de reducción carbotérmica, se favorece a una mayor posibilidad de la formación de carburos, por la superficie específica más amplia que presenta el material fino, que hacen que las extracciones de manganeso en la etapa de lixiviación disminuyan.

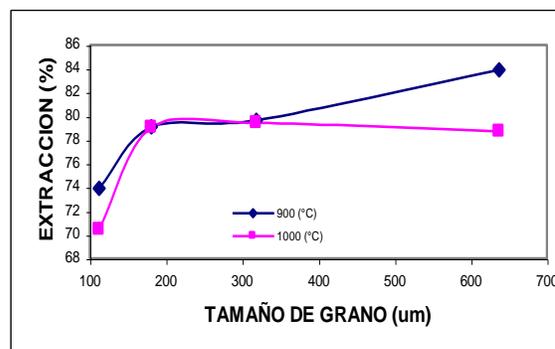


Figura 6. Efecto del tamaño de grano en la extracción de manganeso a 900 y 1,000 °C (C/MnO<sub>2</sub> = 1/1, tiempo de tostación = 2 horas).

### 4.1.3. EFECTO DE LA ADICIÓN DE CARBÓN

A relaciones mayores de C/MnO<sub>2</sub> aumenta la formación de carburos dando paso para que la reacción (3) sea más efectiva, lo que determina una disminución en la formación de MnO, que concuerda con las condiciones de equilibrio termodinámico mostradas en la figura 2, donde se puede observar que a menor formación de MnO, mayor formación de MnC, lo cual es más notorio a temperaturas mayores a 900 °C como se observa en la figura 7.

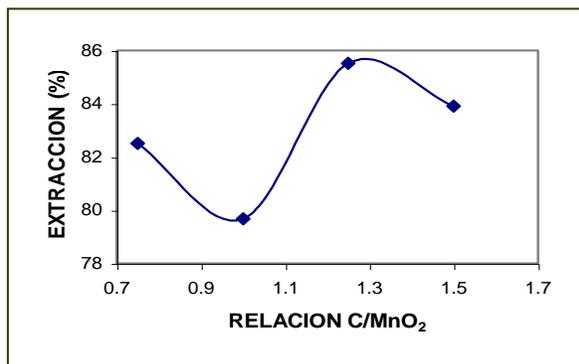


Figura 7. Efecto de la relación C/MnO<sub>2</sub> en la extracción de manganeso. (Temperatura = 900 °C, tiempo = 2 horas y tamaño de grano 637.5 μm).

## 4.2 LIXIVIACIÓN CON AGUA ÁCIDA DE MINA

Se preparó un lote de producto reducido en las mejores condiciones encontradas en el proceso de reducción (tiempo de residencia de 2 horas temperatura 900 °C, tamaño de grano 637.5 micrones, relación C/MnO 1.25), para su posterior lixiviación bajo diferentes relaciones de agua ácida de mina y ácido sulfúrico, y variaciones del porcentaje de sólidos. Las pruebas de lixiviación se han llevado a cabo tomando tiempos de lixiviación de 24 horas para todas las pruebas, bajo agitación constante.

El análisis de la calcina obtenida en la reducción carbo-térmica bajo las condiciones mencionadas es: .

Tabla 3. Análisis químico de la calcina.

| ELEMENTO         | CALCINA |
|------------------|---------|
| Mn               | 52.88 % |
| Fe               | 4.54 %  |
| TiO <sub>2</sub> | 1.05 %  |
| SiO <sub>2</sub> | 2.33 %  |
| Mg               | 0.37 %  |
| Ni               | 0.026 % |
| As               | 0.07 %  |
| Ca               | 2.33 %  |
| Pb               | 0.20 %  |

El análisis de difracción de rayos X de la calcina, muestra que está formada por manganesita, MnO.

### 4.2.1. BALANCE GENERAL DEL PROCESO

En la tabla 4, se muestra el balance general del proceso de lixiviación con agua ácida de mina con todas las pruebas realizadas.

Tabla 4. Pruebas de lixiviación aplicando agua ácida de mina, (promedios).

| Pc (gr) | A/H    | S  | Mn (gr/lit) | V. A. (ml) | V. 1 (ml) | V. 3 (ml) | FS (gr) | E (%)    |
|---------|--------|----|-------------|------------|-----------|-----------|---------|----------|
| 50      | 5 a 1  | 10 | 41248.0     | 355        | 41        | 0.6045    | 24.9344 | 94.306   |
| 50      | 10 a 1 | 10 | 37461.0     | 387        | 22        | 0.6490    | 24.3122 | 91.952   |
| 50      | 10 a 1 | 20 | 54772.0     | 172        | 10        | 0.2350    | 12.8714 | 48.682** |
| 50      | 5 a 1  | 20 | 124008.0    | 158        | 18        | 0.1550    | 19.2212 | 72.698** |
| 50      | 8 a 1  | 15 | 66733.0     | 235        | 19        | 0.3535    | 23.5901 | 89.221   |

\* Concentración de Mn totales (solución preñada más solución de lavado). \*\*Filtración dificultosa.

Pc = Peso de calcina, A/H = Relación de agua ácida de mina y ácido sulfúrico, S = % sólidos, Mn = manganeso disuelto, V.A. = Volumen de A.A.M., V1 = Volumen de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, V3 = Volumen final de solución, FS = Finos de manganeso en la solución, E = Extracción.

### 4.2.2 EFECTO DE LA RELACIÓN AAM/H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> EN LA EXTRACCIÓN

En la figura 8, se representa el efecto de la relación AAM/H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> de 5/1 y 10/1 en función del % sólidos en la solución. La figura muestra que cuando el % sólidos es menor, esta relación en los rangos establecidos no influye mucho; pero si el % sólidos aumenta, este tiene un efecto negativo. Esto debido a que la solución se satura y la cantidad de H<sup>+</sup> es insuficiente para que la reacción se complete.

Por otra parte, se deduce también que la relación A.A.M./H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> es importante en el proceso, ya que esta relación cuando es mayor aumenta la concentración de H<sup>+</sup> en la solución con lo que se llega a un exceso del mismo, lo cual ayuda mucho en la disolución del MnO, por lo que se aumenta la extracción.

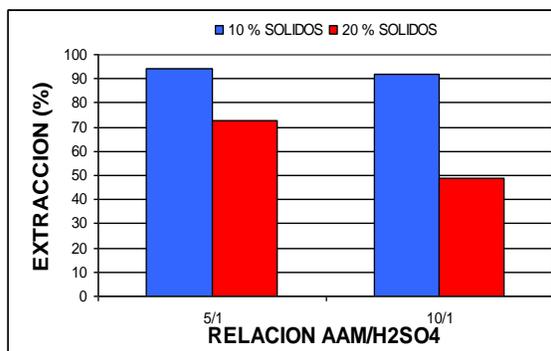


Figura 8. Efecto de la relación AAM/H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> en la extracción.

### 4.2.3. EFECTO DEL % SÓLIDOS EN LA EXTRACCIÓN

La figura 9, muestra cual el efecto del % sólidos con relaciones de AAM/H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> de 10/1 y 5/1 respectivamente. Asimismo, muestra que cuando se aumenta el % sólidos, la extracción disminuye debido a la saturación de la solución al reaccionar por la falta de agente reductor, lo que ocasiona que la reacción sea incompleta.

Ocurre el efecto contrario cuando el % sólidos en la pulpa disminuye, ya que la cantidad de agente reductor está en exceso en relación con el estequiométrico.

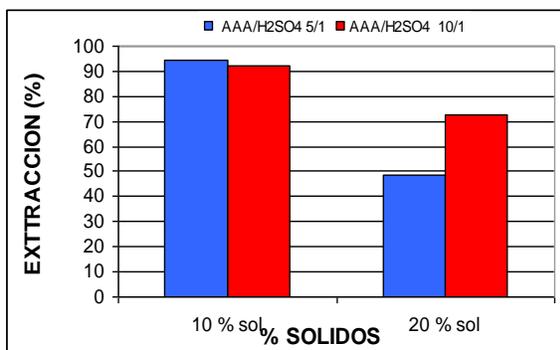


Figura 9. Efecto del % sólidos en la extracción.

### 4.3 APOORTE DEL AGUA ÁCIDA DE MINA EN LA EXTRACCIÓN DE Mn<sup>+2</sup>.

La tabla 5, muestra el aporte del agua ácida de mina en cada una de las pruebas realizadas en esta investigación.

Tabla 5. Aporte del agua ácida de mina en la extracción.

| N° | Pc (gr) | A/H     | S  | V1 (ml) | Ap. Real A.A.M. (%) | E (%)    |
|----|---------|---------|----|---------|---------------------|----------|
| 1  | 50      | 5 a 1   | 10 | 41      | 0.000               | 94.306   |
| A  | 50      | 10 a 1  | 10 | 22      | 7.576               | 91.952   |
| AB | 50      | 10 a 1  | 20 | 10      | 34.397              | 48.682** |
| B  | 50      | 5 a 1   | 20 | 18      | 21.394              | 72.698** |
| C  | 50      | 7.5 a 1 | 15 | 19      | 16.572              | 89.221   |

Mn totales (solución preñada más solución de lavado).  
\*\*Filtración dificultosa.

Pc = Peso de calcina, A/H = Relación de agua ácida de mina y ácido sulfúrico, S = % sólidos, V1 = Volumen de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, Ap. Real A.A.M. = Aporte real de agua ácida de mina, E = Extracción.

El aporte de agua ácida de mina en la extracción aumenta a medida que la relación A.A.M./H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y el porcentaje sólidos aumentan, esto se observa claramente en las pruebas AB y B en donde el % sólidos es igual a 20 y la cantidad de ácido sulfúrico es menor al estequiométrico (26.11 ml) de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Un aporte efectivo del agua ácida de mina se obtiene en la prueba C, ya que su extracción se acerca a las dos mejores pruebas (pruebas 1 y A).

Este aporte se debe esencialmente a la presencia del Fe<sup>+2</sup> en el agua ácida de mina, los cuales ayudan en la disolución del MnO<sub>2</sub> que no ha sido transformado en MnO en la etapa de reducción carbotérmica, por lo cual se eleva la extracción en relación a las pruebas realizadas con ácido sulfúrico puro.

## 5. CONCLUSIONES

Del trabajo de investigación realizado es posible establecer las siguientes conclusiones:

El tratamiento de minerales con alto contenido de manganeso es posible mediante la reducción carbotérmica del MnO<sub>2</sub> con carbón, como primera etapa, y la lixiviación del MnO obtenido por lixiviación en medio ácido.

Una buena reducción de pirolusita con carbón es posible a temperaturas en el rango de 800 a 950 °C. A temperaturas mayores se da lugar a la formación de carburos de manganeso, ocasionando una baja extracción en la etapa de lixiviación ácida.

La relación de C/MnO<sub>2</sub> es una variable importante en la reducción de la pirolusita ya que cuando hay deficiencia de carbón, no se reduce todo el MnO<sub>2</sub>, y cuando esta, está en exceso (mayores a 1.25) se corre el peligro que se formen carburos. La mayor extracción se ha obtenido con una relación de C/MnO<sub>2</sub> igual a 1.25.

El tiempo de residencia que permite la conversión completa del MnO<sub>2</sub> en MnO, para la relación de C/MnO<sub>2</sub> es de dos horas.

El tamaño de grano del carbón no debe ser muy fino ya que generaría la formación de carburos rápidamente, lo que afectaría al rendimiento de la reducción del mineral.

El grado de transformación de MnO<sub>2</sub> a MnO, a la temperatura de 900 °C es de 77.53%.

La lixiviación directa de minerales de alto contenido de manganeso no es recomendable, pues se requiere la presencia de altos contenidos de iones Fe<sup>+2</sup>, generando así productos de difícil filtración.

El uso de ácido sulfúrico para la lixiviación del MnO altamente eficiente. Bajo las condiciones óptimas de reducción carbotérmica y para un exceso del 30% en relación al estequiométrico ha sido posible alcanzar extracciones de 85.510% de manganeso.

La aplicación del agua ácida de mina pura, como una alternativa para reducir costos de acidificación del agente lixivante en el proceso de lixiviación del producto obtenido en la reducción de pirolusita de alto contenido de manganeso, no es suficiente; pues, no se obtienen altas extracciones de Mn, por tanto, es necesario realizar una mezcla de ácido sulfúrico y agua ácida de mina en la lixiviación.

La relación de agua ácida de mina/H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> debe estar entre 5/1 y 10/1 para alcanzar extracciones de manganeso entre 94.3 y 91.9%.

El porcentaje de sólidos en la pulpa, para los rangos de relación de agua ácida de mina/H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> arriba mencionados, es determinante en la extracción de manganeso. El porcentaje de sólidos depende de la cantidad de sólidos en la solución, ya que esta cantidad determina el valor de la relación de AAM/H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y para los valores mencionados en el punto anterior, el valor del % sólidos es de 10%, por que a valores mayores la extracción empieza a disminuir debido a que se necesitaría una mayor cantidad de agente reductor.

La reacción que se produce es altamente exotérmica debido a su comportamiento termodinámico al principio, lo que favorece bastante en la aceleración del proceso, ya que en las primeras horas del proceso aumenta rápidamente la concentración de manganeso en la solución y luego esta va atenuándose hasta estabilizarse.

La variable por ciento sólidos en la etapa de lixiviación es bastante importante; concentraciones de sólidos menores al 10% y mayores al 15% generan extracciones menores de manganeso.

El control del pH es importante durante la lixiviación. Valores de pH por encima de 3.5 dan lugar a la precipitación del hierro, generando dificultades en el proceso de filtración y desfavoreciendo a que se tenga un ambiente ligeramente oxidante necesario para la disolución del MnO.

El comportamiento cinético de la disolución del MnO permite mostrar que son requeridos tiempos de lixiviación entre dos a tres horas para ya alcanzar altas extracciones de Mn.

La aplicación de agua ácida de mina en la etapa de lixiviación ácida produce reacciones altamente exotérmicas que alcanzan temperaturas que varían entre 55 a 80 °C, permitiendo así una mayor disolución del Mn reflejada en la mejor extracción a un menor tiempo. El hecho de que estén involucradas reacciones exotérmicas en el proceso de disolución, permite mantener la temperatura de 40 °C. hasta tres horas de lixiviación.

El proceso de filtración es dificultoso en frío. A temperaturas de 30 a 40 °C, esta se hace sencilla; por tanto, el aprovechar la temperatura de la solución generada en la etapa de lixiviación es recomendable.

Si el proceso se para a las tres horas, el queque obtenido después de la filtración, reacciona con el agua de lavado completando así la lixiviación.

Con los resultados obtenidos se ha encontrado el siguiente modelo matemático que refleja el comportamiento de las variables estudiadas en el proceso de lixiviación con agua ácida de mina para los rangos predeterminados.

$$Y = 139.9300 - 1.9149 X1 - 3.1143X2$$

En la siguiente tabla se resume los resultados más favorables del proceso de lixiviación aplicando agua ácida de mina:

Tabla 6. Valores de las variables y constantes con los que se ha obtenido mejores resultados en el proceso de lixiviación con agua ácida de mina.

| VARIABLE                           | PARÁMETRO  | UNIDAD |
|------------------------------------|------------|--------|
| % Sólidos                          | 10         |        |
| AAM/H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | 5/1 - 10/1 |        |
| CONSTANTES                         |            |        |
| Tiempo de lixiviación              | 24         | horas  |
| Velocidad de agitación             | 600        | rpm    |
| Tamaño de grano                    | 637.5      | µm     |

Bajo estas condiciones, es posible obtener extracciones entre 89 y 96% de Mn.

El aporte del agua ácida de mina aumenta a medida que disminuye la cantidad de ácido sulfúrico e incrementa el % sólidos.

De todo lo mencionado con anterioridad, podemos decir que el agua ácida de mina pura no es un buen sustituto, pero acompañado con ácido sulfúrico, se convierte en una buena alternativa por estar disponible en cualquier yacimiento, por su fácil generación y ser un agente barato, y además al darle uso, se puede evitar una mayor contaminación en el lugar donde se genera la misma.

## 6. REFERENCIAS

- Joffré J.; "Manganeso", Perfil Minero Metalúrgico N° 9, I I M M, 1977.
- Mena Fuentes R., "Aplicación de agua ácida de mina en la lixiviación de minerales de manganeso", trabajo dirigido, Oruro, 1999.
- Zamora G. "Aplicación de aguas ácidas de mina en procesos de lixiviación", Revista Metalúrgica N° 19, 1999.
- Usnayo J. , "Lixiviación de minerales de alto contenido de manganeso por proceso piro/hidrometalúrgico, aplicando agua ácida de mina", Planificación de Proyecto de Grado, Oruro, 2000.
- H. S. C. , PAQUETE COMPUTACIONAL DE DATOS TERMODINÁMICOS.
- Velasco C. Informe de pruebas exploratorias con manganeso, Oruro, 1999.
- Pourbaix M., "Atlas of electrochemical equilibria in aqueous solutions", Pergamon Press, London, 1965.