

## Cinética de molienda de las escombreras del distrito Pachuca – Real del Monte, Estado de Hidalgo, México

### Kinetics of grinding of the tailings of the Pachuca – Real del Monte district, State of Hidalgo, Mexico

Juan Hernández Ávila <sup>a,\*</sup>, Eduardo Cerecedo Sáenz <sup>a</sup>, Norman Toro<sup>b,c</sup>, Alberto Arenas Flores <sup>a</sup>,  
Ventura Rodríguez Lugo <sup>a</sup>, Eleazar Salinas Rodríguez <sup>a</sup>.

<sup>a</sup> Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Carretera Pachuca-Tulancingo km 4.5, Mineral de la Reforma, Hidalgo 42184, México.

<sup>b</sup> Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Arturo Prat, Antofagasta 1244260, Chile.

<sup>c</sup> Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas, Universidad Católica del Norte, Antofagasta 12770709, Chile.

#### Resumen

En el presente estudio se llevó a cabo la cinética de molienda tamaño por tamaño y especie por especie de las escombreras de Dos Carlos de la ciudad de Pachuca, Hidalgo, México; presentando una composición química promedio en % de 70.43 de SiO<sub>2</sub>, 7.032 de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 2.69 de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 0.70 de Mn, 3.98 de K<sub>2</sub>O, 3.34 de CaO, 2.50 de Na<sub>2</sub>O, 1.01 de MgO, 0.26 de TiO<sub>2</sub>, 0.04 de Zn, 0.026 de Pb, 56 g/ton de Ag y 0.6 g/ton de Au; apreciándose como fases mineralógicas mayoritarias: cuarzo, albita, argentita, berlinita, ortoclasa, jarosita de potasio argentífera, jarosita de sodio argentífera, feldespato, Anortoclasa, Calcita. Los resultados experimentales muestran que a medida que el tiempo de molienda se incrementa hasta valores comprendidos entre 32 y 46 minutos, la distribución de los contenidos metálicos es muy similar y se encuentran dados por el rango de 200 a 400 mallas, la máxima velocidad específica de molienda global (tamaño por tamaño) y por especie correspondiente a la malla 200, para tamaños menores a la malla 200 se genera una disminución en la velocidad específica por especie (plata), determinándose que el tiempo óptimo de molienda encontrado bajo estas condiciones estudiadas fue de 8 minutos.

#### Palabras Clave:

Molienda, plata, escombreras, cinética.

#### Abstract

In the present study, the grinding kinetics size by size and species by species of the Dos Carlos Tailings of the city of Pachuca, Hidalgo, Mexico were carried out; presenting an average chemical composition in % of 70.43 de SiO<sub>2</sub>, 7.032 de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 2.69 de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 0.70 de Mn, 3.98 de K<sub>2</sub>O, 3.34 de CaO, 2.50 de Na<sub>2</sub>O, 1.01 de MgO, 0.26 de TiO<sub>2</sub>, 0.04 of Zn, 0.026 of Pb, 56 g / ton of Ag and 0.6 g / ton of Au; being appreciated as the majority mineralogical phases: quartz, albite, argentite, berlinite, orthoclase, silver-bearing potassium jarosite, silver-bearing sodium jarosite, feldspar, Anortoclase, Calcite. The experimental results show that as the grinding time increases to values between 32 and 46 minutes, the distribution of the metallic contents is very similar and they are given by the range of 200 to 400 meshes, the maximum specific speed of global grinding (size by size) and by species corresponding to 200 mesh, for sizes smaller than 200 mesh a decrease in the specific speed is generated by species (silver), determining that the optimal grinding time found under these studied conditions was 8 minutes.

#### Keywords:

Grinding, silver, tailings, kinetics.

#### 1. Introducción

En la actualidad los residuos mineros producto de más de 500 años de minería en el Estado de Hidalgo, México; han dejado un volumen de 112 Millones de toneladas, dando como resultado cuatro depósitos de desechos mineros con contenidos de Ag y Au que oscilan entre 25 – 120 gton-1(1-4) y de 0.3-1.5 gton-1 (Hernández, et al., 2011; Cárdenas y Dueñas, 1992; Salinas, et al.,

2020; Salinas, et al., 2016; Hernández, et al., 2013), respectivamente. Estas escombreras contienen minerales piríticos y cuarcíferos en donde los valores metálicos se encuentran encapsulados en las partículas de cuarzo, lo cual complica la extracción de los metales preciosos. Por otro lado, también la presencia de algunos elementos y especies consumidoras de cianuro (cianicidas), no permiten en muchos casos lograr una extracción adecuada de los valores metálicos, contenidos en

\*Autor para la correspondencia: [jhdezavila@hotmail.com](mailto:jhdezavila@hotmail.com)

Correo electrónico: [jhdezavila@hotmail.com](mailto:jhdezavila@hotmail.com) (Juan Hernández Ávila), [mardenjazz@yahoo.com.mx](mailto:mardenjazz@yahoo.com.mx) (Eduardo Cerecedo Sáenz), [ntoro@ucn.cl](mailto:ntoro@ucn.cl) (Norma Toro), [arenasa@uaeh.edu.mx](mailto:arenasa@uaeh.edu.mx) (Alberto Arenas Flores), [ventura.rl65@gmail.com](mailto:ventura.rl65@gmail.com) (Ventura Rodríguez-Lugo), [salinasr@uaeh.edu.mx](mailto:salinasr@uaeh.edu.mx) (Eleazar Salinas-Rodríguez)

compuestos refractarios, lo cual constituye un problema metalúrgico de los procesos convencionales (Flores, et al., 2014; Hernández, et al., 2009; Ramírez, 1978).

Por otra parte, la molienda es la operación unitaria que constituye el paso final de reducción de tamaño o liberación de partículas de minerales, el problema consiste en reducir el género de 3/8” (9000 – 10000 micras), a un tamaño límite que se encuentra normalmente entre 35 y 200 mallas (420-74 micras) presente en las escombreras.

La molienda óptima puede definirse como aquella distribución granulométrica que genera los mejores beneficios económicos (Hernández, et al., 2009), por lo cual la molienda es una de las etapas claves en el procesamiento de minerales y la metalurgia extractiva de los metales preciosos. Por tanto, es una de las operaciones unitarias que ha atraído la mayor atención de los investigadores (Hernández, et al., 2009; Ramírez., 1978; Harris, 1970; Harris, 1971; Horst, and Bassarear., 1976; Reid., 1965; Tanaka and Selby., 1976; Austin and Bathia., 1972).

Esta operación puede ser simulada mineral por mineral y tamaño por tamaño, con un modelo llamado de orden p-acumulativo usando conceptos de Harris y Horst (Harris, 1970; Harris, 1971; Horst, and Bassarear., 1976). Las principales características de este modelo son las siguientes: 1) La alimentación está caracterizada por una distribución granulométrica global y los contenidos de distribución para las especies del mineral constitutivos; 2) Después del tiempo medio de residencia en el molino, la descarga muestra también distribuciones granulométricas y contenidos de distribución para las especies minerales constituyentes; 3) El flujo volumétrico de la pulpa es necesario en el cálculo del tiempo promedio de residencia en el molino; 4) La transferencia de la pulpa a través del molino.

Debido a la complejidad en el seguimiento de cada mineral, Harris (Harris, 1971; Tanaka and Selby., 1976), propusieron el modelo cinético acumulativo de molienda de primer orden:

$$c_i(t) = c_i(0) \exp(-k_i t) \quad (1)$$

Donde  $c_i(t)$  es la fracción granulométrica acumulativa más gruesa que la apertura de la malla denotada por el subíndice  $i$ , producida por la molienda durante el tiempo  $t$ .  $c_i(0)$ , igual que el anterior pero en la alimentación al molino.  $k_i$  es la velocidad específica acumulativa de molienda en minutos de la fracción más gruesa que la malla  $i$ .

La dificultad propia del modelo de primer orden es el de no preservarse sobre intervalos tan grandes de tamaño (Ramírez, J., 1978), destacándose para las fracciones gruesas una desviación sistemática de la cinética de primer orden, conocida como fracturado anormal (Taggart, 1948). Para que la desviación antes mencionada pueda tomarse en cuenta, Harris (Harris, 1970; Harris, 1971), propuso una técnica de ajuste de No-Primer-orden. Esta ecuación da dos parámetros adaptables ( $b$  y  $P$ ) con los cuales se ajustan los datos granulométricos de molienda; esto es mucho más útil en ajustes especiales cuando se considera un amplio rango de tamaños.

$$C_i(t) = C_i(0) \exp(-b_i t^P) \quad (2)$$

Donde  $b_i$  es la velocidad específica de fractura con base acumulativa de fracción masa, más gruesa que el tamaño  $i$

(Dimensiones: tiempo  $-pi$ ).  $pi$  es el orden de la cinética de molienda de fracción masa más gruesa que el tamaño  $i$  (Adimensional),  $b_i$  y  $pi$  son determinados por la técnica de mínimos cuadrados. En nuestro caso, el modelo de p-orden dado por la ecuación (3) se amplía para ser aplicado a cada mineral sacando  $\ln$  del  $\ln$  para cada uno de los casos:

$$\ln \ln c_{m,i}(0)/c_{m,i}(t) = p_{m,i} \ln t + \ln b_{m,i} \quad (3)$$

Donde el suscrito  $m$  adicional significa que cada parámetro se define para cada componente (Ag) o mineral individualmente. Este modelo matemático resulta muy útil cuando se quiere simular el comportamiento en molienda de una especie mineralógica cualquiera (o de todas) que forma parte del material todo-uno. Las ecuaciones (1), (2) y (3) constituyen la base principal para el estudio de molienda y determinar sus condiciones óptimas de operación para la liberación máxima de los valores de Ag encapsulados en las partículas de sílice de las escombreras del estado de Hidalgo. Estos modelos serán utilizados para realizar el estudio cinético de molienda tipo “batch” en forma global tamaño por tamaño y especie por especie de dichas escombreras. Los resultados cinéticos de la molienda pueden ser alimentados al simulador, para determinar en estudios posteriores la configuración del circuito óptimo de molienda.

Por lo tanto, en este proyecto se plantea la recuperación del oro y la plata mediante la aplicación de este modelo de molienda (Patiño & Ramírez, 1991), los cuales se encuentran en las partículas cuyo tamaño porcentualmente mayoritario es del orden de  $-75 \mu m$  (60-65%).

## 2. Desarrollo Experimental

Para la realización de la cinética de molienda se trabajó con una muestra representativa de 50 Kg de las escombreras, sometiéndola a mezclado y cuarteo para obtener 10 muestras idénticas de aproximadamente 2 Kg cada una. A continuación se sometieron a molienda tipo “batch” por 0, 2, 4, 8, 16, 32 y 46 minutos, en una unidad de molienda marca Denver, que consta de una Unidad de Rodillos para Molienda (Denver) y un Molino de bolas (Denver), determinándose previamente los parámetros de operación del molino, como la velocidad crítica ( $V_c$ ), velocidad de trabajo ( $V_t$ ), peso de pulpa ( $P_{pulpa}$ ), etc. Los productos derivados de la molienda fueron sometidos a tamizado en húmedo, utilizando la Serie Tyler de la malla N° 80, 100, 140, 200, 270 y 400. Las fracciones así obtenidas en el tamizado de muestras de  $t = 0$  a  $t = 46$  minutos de molienda, se analizaron para plata, oro y silicio por el método de Espectrofotometría de Absorción Atómica, para realizar el estudio granulométrico de la descarga del molino, tamaño por tamaño y especie por especie de interés económico (Ag y Au).

Para la Evaluar el efecto del tiempo de molienda por medio de lixiviación con tiosulfatos de las escombreras se efectuaron una serie de experimentos, bajo las siguientes condiciones experimentales: Parámetro variable: tiempo de molienda: 0, 2, 4, 8, 16, 32, 46 min., Parámetros constantes:  $[S_2O_3] = 79 \text{ gL}^{-1}$ , Temperatura = 298 K, mineral =  $40 \text{ gL}^{-1}$  (todo uno), pH = 9, volumen de solución = 500 mL, velocidad de agitación  $500 \text{ min}^{-1}$ , presión parcial de  $O_2 = 1 \text{ atm}$ . Durante todo el proceso experimental el pH se mantuvo constante adicionando al reactor solución de NaOH 0.2 M previamente preparada. El avance de la

reacción se evaluó igualmente por análisis cuantitativo de Ag a los diferentes tiempos de reacción, previamente establecidos.

### 3. Resultados

La muestra estudiada de las escombreras de Dos Carlos presenta leyes de 56.00 g Ag/ton (en forma de argentita) y de 0.6 g Au/Ton, contenidas en una matriz silicosa con valores de 70.04 % de sílice, esta muestra viene acompañada significativamente de 2.683 % de Fe en forma de pirita, el resto de los sulfuros metálicos se presentan insignificativamente, mientras que los minerales metálicos como la alúmina, la calcita y magnesita no representan problema alguno para la lixiviación de los metales preciosos, encontrándose como una de las principales limitantes el encapsulamiento de la argentita en cristales de cuarzo principalmente.

En la figura 1 se presenta la distribución de los tamaños observándose un comportamiento bimodal para los tiempos 0, 2, 4, 8, 16 minutos, mientras que para los tiempos 32 y 46 minutos se observa una distribución modal. En otras palabras, existe una fuerte tendencia a una distribución modal de tamaños a medida que el tiempo de molienda se incrementa de 32 a 46 minutos.

Este desdoblamiento de las ondas granulométricas dadas por el rango de tamaño de partículas de 80 a 140 mallas, implica la transformación de estos tamaños a una distribución de tamaños dada por el rango de 200 a 400 mallas correspondiente a la distribución modal.

Los materiales finos (malla -400) presentan una distribución similar para los tiempos de 32 y 46 minutos, ya que se observa un cambio notable en la generación de % de peso retenido para los distintos tiempos de molienda.

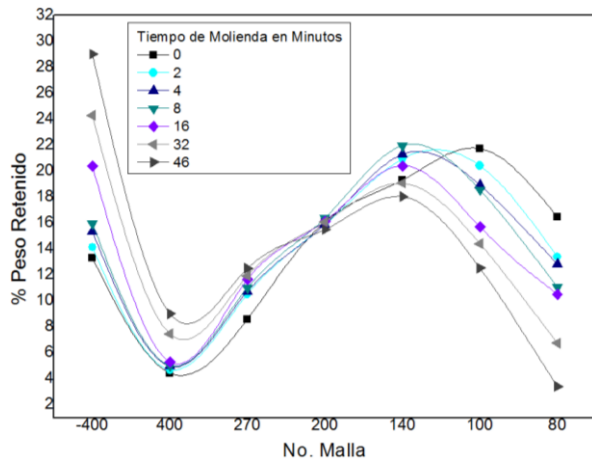


Figura 1: Distribución granulométrica de las submuestras de escombrera a diferentes tiempos de molienda.

En la figura 2 se observa una distribución bimodal con una fuerte tendencia a una distribución modal, con relación al tiempo 0 (cero) de molienda. Se observa que disminuye el % de peso en plata para los tamaños de partícula con malla 270, después un ligero aumento para el número de malla 200, con una consecuente disminución en el número de malla 80 hasta 20 % de peso de Ag. Esta representación es muy importante por tratarse del máximo tiempo de molienda con el mayor % en peso retenido. El comportamiento

de la distribución de esta especie metálica es similar para todos los tiempos de 2 a 46 minutos de molienda, con un máximo de contenido de Ag en el número de malla <400 y una caída del contenido para el intervalo de número de malla 400, 270 y 200, posteriormente disminuye el contenido de Ag hasta aproximadamente 30% para los tiempos de molienda de 32 a 46.

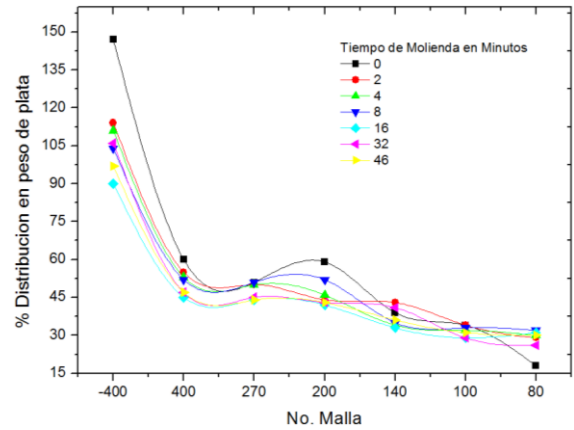


Figura 2: Distribuciones granulométricas de plata en función del tiempo de molienda.

#### Distribución de plata

En la figura 3 se muestra la distribución del % de peso acumulativo (+) plata en los rangos de tamaños dados por la malla 80 a 100 y 140 a 400 con un comportamiento lineal y no lineal, respectivamente.

A medida que el tiempo de molienda se incrementa, los valores metálicos de plata se distribuyen en los tamaños de partículas más pequeños, así para los tiempos de 2, 4, 8 y 16 minutos de molienda la plata se distribuye en los rangos granulométricos de la malla 80 a 400, mientras que para 32 y 46 minutos, estos valores se localizan entre la malla 140 y 400, en estos tiempos de molienda se aprecia que la distribución de la plata contenida en el material más fino, es muy similar, lo que implica que más allá de 32 minutos tendremos una mínima liberación de los contenidos metálicos.

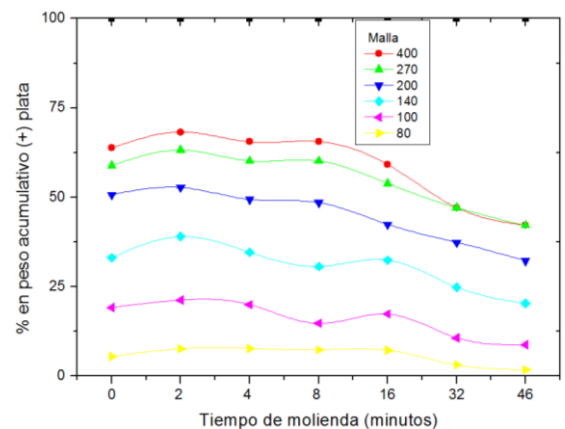


Figura 3: Porcentaje acumulativo más fino de plata vs tiempo de molienda.

Así mismo, se observó una distribución lineal donde a medida que el tiempo de molienda aumenta, disminuye la fracción en peso acumulativo (+) menos finos de los tamaños gruesos para

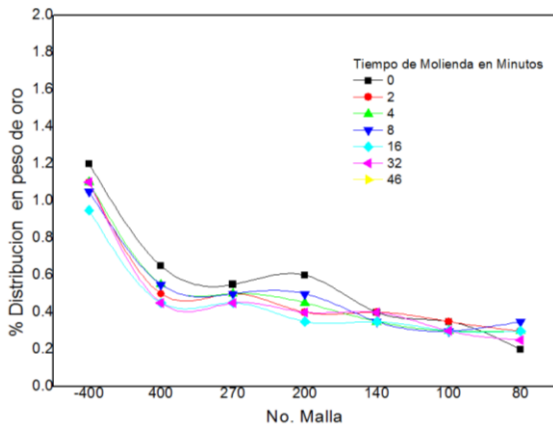
transformarse a fracciones en peso (+) menos finos, pero tamaños de partículas más pequeñas.

Por lo que para tiempos de molienda de 2 a 16 minutos se obtuvo una distribución granulométrica de 80 a 140 mallas, mientras que para 32 y 46 minutos se obtuvo una distribución dada por el rango de 200 a 400 mallas, esto significa que las fracciones de 80 a 100 se transformaron en su mayoría a rangos de tamaños comprendidos de malla 200 a 400, el porcentaje de transformación en este rango no es muy apreciable, independientemente de que la diferencia de tiempo sea significativa. Esto se debe a que la velocidad de molienda se vuelve lenta para fracciones cada vez más pequeñas por lo que su tiempo de residencia aumenta apreciablemente.

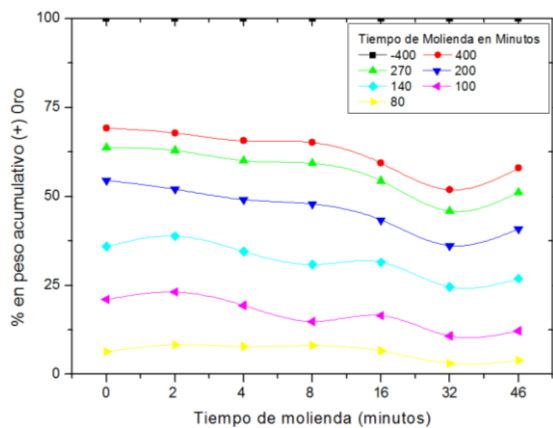
**Distribución de Oro**

Para el oro al igual que la plata se observa una distribución irregular de estos valores metálicos, imponiéndose una fuerte tendencia a elevarse el contenido de oro a medida que se incrementa el tiempo de molienda y disminuye el tamaño de partícula (figura 4), observando una tendencia a una distribución modal con el incremento del contenido metálico.

El comportamiento de la distribución de esta especie metálica es similar para todos los tiempos de 0 a 32 minutos de molienda, mientras que para el tiempo de 46 minutos cambia notablemente este comportamiento, donde los contenidos máximos de oro se ubican en la malla 400 para la molienda de 46 minutos.



**Figura 4: Distribuciones granulométricas de oro a 0, 2, 4, 8, 16, 32, 46 minutos de molienda.**



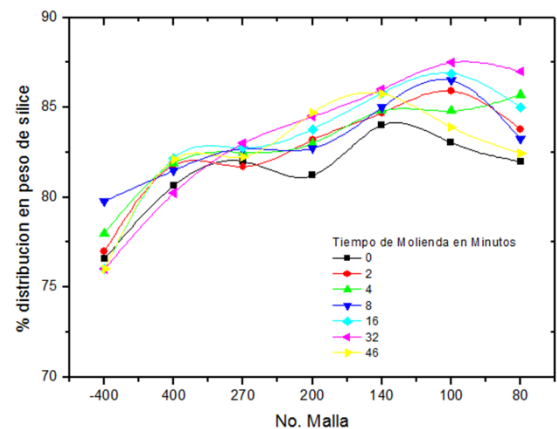
**Figura 5: Porcentaje acumulativo más grueso de oro Vs tiempo de molienda.**

En la figura 5 se muestra la distribución del oro con base a la acumulativa más fino (-) en los rangos de tamaños dados por la malla 80 a 400 y 150 a 400 con un comportamiento lineal y no lineal respectivamente al igual que la plata. A medida que el tiempo de molienda se incrementa los valores metálicos de oro también se distribuyen en los tamaños de partículas más pequeños.

**Distribución de sílice**

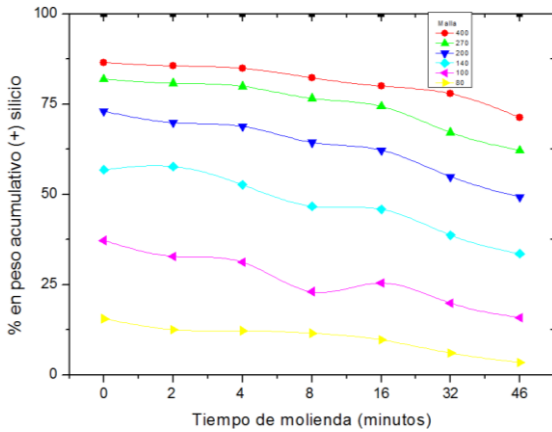
Para el estudio del comportamiento de sílice se observó una distribución irregular de estos valores no metálicos, imponiéndose una tendencia a elevarse el contenido de sílice a medida que se incrementa el tiempo de molienda y a disminuir a medida que se reduce el tamaño de partícula (figura 6). Se observó una distribución bimodal con una fuerte tendencia a una distribución modal al disminuir los contenidos de sílice.

El comportamiento de la distribución de esta especie no metálica es similar para todos los tiempos de 0 a 8 minutos de molienda, mientras que para los tiempos de 16 a 46 minutos cambia notablemente, donde los contenidos máximos de sílice se ubican en la malla 80 para la molienda de 32 minutos, mientras que para el tiempo de 46 minutos, el máximo contenido se sitúa en un rango mayor comprendido en las mallas 140 y 200, por lo que se determinó que los puntos máximos para los diferentes tiempos de molienda corresponden a la molienda de 32 minutos.



**Figura 6: Distribuciones granulométricas de sílice a 0, 2, 4, 8, 16, 32, 46 minutos de molienda.**

En la figura 7 se muestra la distribución de sílice con base a la acumulativa más fino (-) en los rangos de tamaños dados por la malla 80 a -400 y 140 a -400 con un comportamiento lineal y no lineal, respectivamente.



**Figura 7: Porcentaje acumulativo más grueso de sílice vs tiempo de molienda.**

A medida que el tiempo de molienda se incrementan los valores de sílice se distribuyen en los tamaños de partículas más gruesas, así para los tiempos de 2,4 y 8 minutos la sílice se distribuye en los rangos granulométricos de la malla 80 a 400, mientras que para 16, 32 y 46 minutos, estos valores se localizan entre la malla 140 y 400, en estos tiempos de molienda se aprecia que la distribución de sílice contenido en el material más fino, es muy similar.

La tabla 1 resumen los resultados de la cinética de molienda de P-orden en forma global y por especie, para las cuales se utilizó la ecuación:  $\ln \ln ((C_{m,i}(0))/(C_{m,i}(t))) = P_{m,i} \ln t + \ln b_{m,i}$  y aplicando el método de regresión lineal, se determinaron los valores de  $P_{m,i}$  y  $b_{m,i}$ . estos parámetros junto con las distribuciones granulométricas, constituyen la base para realizar la simulación global y por especie de la molienda.

$b_i$  = es la velocidad específica de fractura con base-acumulativo de fracción masa, más gruesa que el tamaño  $i$ . (dimensiones tiempo- $P_i$ ).

$P_i$  = es el orden de la cinética de molienda de fracción masa más grueso que el tamaño  $i$ , (adimensional).

$P_i$  y  $b_i$  son determinados por la técnica de mínimos cuadrados.

$W_i$  son las fracciones de masa retenida en los tamices para las diferentes moliendas (0, 2, 4, 8, 16, 32, 46).

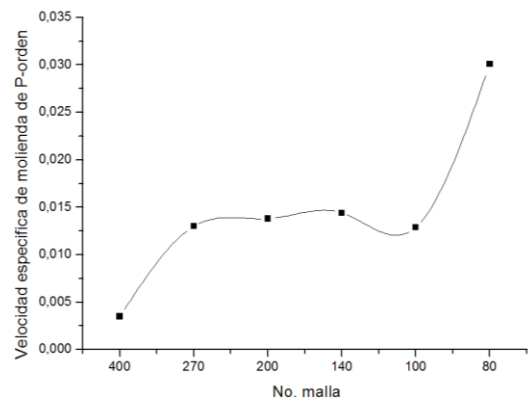
Tabla 1: Cinética de molienda global (P-Orden)

MALLA	$\frac{W_i(0)}{W_i(2)}$	$\frac{W_i(0)}{W_i(4)}$	$\frac{W_i(0)}{W_i(8)}$	$\frac{W_i(0)}{W_i(16)}$	$\frac{W_i(0)}{W_i(32)}$	$\frac{W_i(0)}{W_i(46)}$	$P_i$	$b_i$
80	0.77	0.71	0.75	0.76	1.74	3.01	0.9815	0.030
100	0.90	0.96	1.30	1.10	1.79	1.08	0.9914	0.012
140	0.85	0.96	1.08	1.02	1.33	1.63	0.991	0.014
200	0.96	1.027	1.05	1.20	1.38	1.57	0.9915	0.013
270	0.93	0.98	0.98	1.09	1.25	1.40	0.9914	0.01
400	0.93	0.97	0.97	1.08	1.19	1.28	0.9977	0.003

La figura 8 presenta el trazo de la velocidad específica de molienda de la especie metálica de plata, donde se observó un incremento considerable de la velocidad al disminuir el tamaño de partícula de la malla 80 a la 100 haciendo la observación que este rango corresponde a una granulometría gruesa.

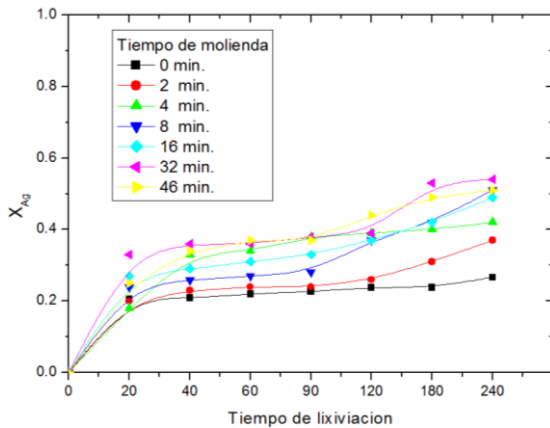
Posteriormente se incrementa considerablemente hasta un punto máximo correspondiente a la malla 140 y ahí vuelve a disminuir apreciablemente hasta la malla 400.

Por lo tanto se puede concluir que la máxima velocidad de molienda global y por especie ocurre en la malla 140, sin embargo la velocidad específica de molienda de la plata tiende a estabilizarse al pasar de la malla 140 a la 270, por otra parte la velocidad de molienda de tamaño por tamaño de partícula experimenta un incremento en su velocidad al pasar de la malla 270 a la 400, incrementando la cantidad de finos, mientras que la plata contenida en estos tamaños de partícula difícilmente sufrirá alteraciones en su tamaño, por lo que una molienda fina, difícilmente podrá liberar más a la especie plata, a cambio de esto se producirá excesivamente la cantidad de finos (lamas). Por lo que finalmente se determinó que el tiempo óptimo de molienda es de 8 minutos y un tamaño de partícula óptimo de 200 mallas.



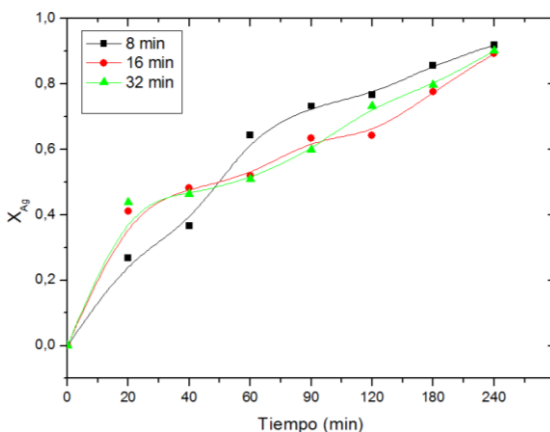
**Figura 8: Velocidad específica instantánea de molienda global Vs No. de malla.**

En la figura 9 se muestran los resultados la lixiviación de plata realizada a las escombreras a diferentes tiempos de molienda, con el propósito de poder determinar el efecto de tiempo de molienda sobre la fracción de Ag extraída, donde se puede observar que el tiempo de inducción es mínimo y que al aumentar el tiempo de molienda la recuperación se incrementa paulatinamente hasta tener 54% de recuperación de Ag como máximo, y que para los tiempos de molienda de 8 a 46 minutos la recuperación de plata en el licor lixiviante no presenta gran variación ya que va de 49 a 54 %, por lo cual se concluye que a temperatura ambiente después de una molienda de 8 minutos la recuperación de plata es muy semejante, así mismo para poder determinar el tiempo óptimo de molienda con respecto a las recuperaciones de plata en solución es necesario tomar en cuenta también el consumo de energía utilizada para efectuar este proceso ya que a nivel industrial el 60 % de los costos del proceso lo consume la molienda.



**Figura 9: Extracción de plata en función del tiempo, Efecto Tiempo de Molienda**  $[\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3] = 79 \text{ gL}^{-1}$ , temperatura= 298 K; mineral =  $40 \text{ gL}^{-1}$ , pH = 9, vol. sol. = 500 mL, velocidad de agitación=  $500 \text{ min}^{-1}$ .

Por otra parte, en trabajos realizados anteriormente (Salinas, et al., 2016), se ha determinado que al incrementar la temperatura (de 298 a 323 K) la eficiencia del tiosulfato incrementa, por lo cual se realizó la lixiviación a 323 K de las escombreras a los tiempos de molienda de 8, 16, 32 minutos con el propósito de poder determinar y precisar el tiempo de molienda óptimo de las escombreras. En la figura 10 se puede apreciar que para los tiempos de molienda de 8, 16 y 32 minutos la recuperación en solución de plata oscila entre el 89.29 % y el 91.96 %, por lo cual se puede concluir que para tiempos mayores de 8 minutos la recuperación de plata en solución es muy similar por lo cual se optó en tomar como molienda óptima 8 minutos, siendo este tiempo de molienda razonable para poderse implementar a nivel industrial en un futuro.



**Figura 10: Extracción de plata en función del tiempo, Efecto Tiempo de Molienda**  $[\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3] = 79 \text{ gL}^{-1}$ , temperatura= 323 K; mineral =  $40 \text{ gL}^{-1}$ , pH = 9, vol. sol. = 500 mL, velocidad de agitación=  $500 \text{ min}^{-1}$ .

#### 4. Conclusiones

1. La técnica experimental desarrollada en la molienda, así como el modelo cinético de molienda utilizado son adecuados para el problema planteado, ya que permite obtener resultados suficientes, los cuales mediante un análisis detallado se logra precisar la molienda óptima en función de la recuperación por lixiviación.
2. A medida que el tiempo de molienda se incrementa hasta valores comprendidos entre 16 minutos, la distribución de los

contenidos metálicos es muy similar y se encuentran dados por el rango de 200 a 400 mallas.

3. La cinética de molienda permite precisar que la máxima velocidad específica de molienda global (tamaño por tamaño) y por especie correspondiente a la malla 200, para tamaños menores a la malla 200 se genera una disminución en la velocidad específica por especie (plata) la cual se estabiliza para tamaños comprendidos por la malla 200 a 400, mientras que la velocidad específica global repunta para tamaños < 270.

El tiempo óptimo de molienda encontrado bajo estas condiciones estudiadas fue de 8 minutos.

#### Agradecimientos

Los autores agradecen y expresan su gratitud al CONACYT por la distinción SNI como miembros investigadores y el estímulo recibido cada mes.

#### 5. Referencias

- Austin, L. G. and Bathia, V.K., (1972), "Experimental methods for grinding studies in Laboratory Mills", *Powder Technology* 5, 261-266.
- Cárdenas Vargas J.; Dueñas García J.C. (1992). Monografía geológico-minera del estado de Hidalgo, Consejo de Recursos Minerales, Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal, (México), P 95. ISBN, 9686710086, 9789686710083
- Flores Badillo, J., Hernández Ávila, J., Patiño Cardona, F., Pineda, T., Yacelit, N., Santos, O., & Abacú, J. (2014, August). Developing Alternative Building Materials from Mining Waste. In *Advanced Materials Research* Vol. 976, 202-206. <https://www.scientific-net/AMR.976.202>
- Harris, C. C., (1970) 'The effect of time on Batch Grinding', *Powder Technology* 4, 57-60.
- Harris, C. C., (1971), 'The Alyasdin – Weibull chart in Batch Comminution kinetics', *Trans., Inst. Min. Met.* 80, 41-44.
- Hernández, A. J., Salinas, R. E., Patiño, C. F., Rivera, L. I., Reyes, P. M., Perez, L. M., Cerecedo, S. E. (2011), Characterization of Burrows from Mining District of Pachuca–Real Del Monte, in Hidalgo State and Viability Study to Use These Residues as Alternate Industrial Material. In *EPD Congress*, 73-80. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9781118495285.ch9>
- Hernández, A. J., Patiño, C. F., Rivera, L. I., Salinas, R. E., Alamilla M. M., Cerecedo, S. E., Reyes, P. M., Perez, L. M., (2009), Silver Dissolution From The Waste Mounds Of Pachuca, Hidalgo State, Mexico – Effect Of Cyanide Concentration On Dissolution Rate, (European Metallurgical Conference EMC).
- Hernández, J., Rivera, I., Patiño, F., & Juárez, J. C. (2013). Estudio Cinético de la Lixiviación de Plata en el Sistema  $\text{S}_2\text{O}_3(2-)-\text{O}_2-\text{Cu}^{2+}$  Contenido en Residuos Minero-Metalúrgicos. *Información tecnológica*, 24(1), 51-58. [https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?pid=S0718-07642013000100007&script=sci\\_arttext&tlng=en](https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?pid=S0718-07642013000100007&script=sci_arttext&tlng=en)
- Horst, W. E. and Bassarear, J. E., (1976), 'Use of Ore Grindability Technique to Evaluate Plant Performance', *Trans. AIME* 260, 348-351. [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-011-3684-6\\_3](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-011-3684-6_3)
- Patiño F. & Ramírez J., (1991) Grinding of the Jales de Santa Julia de la Compañía Real del Monte y Pachuca, S.A. de C.V. México, EMC'91: Non-ferrous Metallurgy – Present and future, Elsevier Applied Science, London and New York, [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-011-3684-6\\_3](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-011-3684-6_3)
- Ramírez, J., (1978), Simulation of proposed grinding circuit change to reduce Pb Sliming, Tesis de Master of Engineering, Department of Mining and Metallurgical Engineering McGill University, Montreal, Canada, 1-160.
- Reid, K. J., (1965), "A solution to the Batch Grinding Equation", *Chem. Eng. Sci.* (20), 953-963.
- Rivera, I., Patiño, F., & Juárez, J. C. (2013). Estudio Cinético de la Lixiviación de Plata en el Sistema  $\text{S}_2\text{O}_3(2-)-\text{O}_2-\text{Cu}^{2+}$  Contenido en Residuos Minero-Metalúrgicos. *Información tecnológica*, 24(1), 51-58. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642013000100007>
- Salinas-Rodríguez, E., Flores-Badillo, J., Hernández-Avila, J., Cerecedo-Saenz, E., Gutierrez-Amador, M., Jeldres, R. I., & Toro, N. (2020).

- Assessment of Silica Recovery from Metallurgical Mining Waste, by Means of Column Flotation. *Metals*, 10(1), 72. 1-12  
<https://www.mdpi.com/2075-4701/10/1/72>
- Salinas-Rodríguez, E., Hernández-Ávila, J., Rivera-Landero, I., Cerecedo-Sáenz, E., Reyes-Valderrama, M. I., Correa-Cruz, M., & Rubio-Mihi, D. (2016). Leaching of silver contained in mining tailings, using sodium thiosulfate: A kinetic study. *Hydrometallurgy*, 160, 6-11.
- [HTTP://WWW.SCIENCEDIRECT.COM/SCIENCE/ARTICLE/PII/S0304386X15301559](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304386X15301559)
- Taggart, A. F. (1948). *Handbook of mineral dressing*. Wiley.
- Tanaka, T. and Selby, D. W., (1976) "A Kinetic approach to interference effects in the grinding of binary mixtures", *Proc. Aust. Min. Met.* 258, 41-45.