

TOSTACIÓN, EMPLEANDO MICROONDAS, EN MENAS REFRACTARIAS AURÍFERAS Y SU EFECTO EN LA EXTRACCIÓN DEL ORO

USING MICROWAVES IN AURIFEROUS REFRACTORY MENAS AND THEIR EFFECT IN THE EXTRACTION OF GOLD

ANA C. GAVIRIA C.

Universidad Nacional de Colombia - Medellín, Escuela de Ingeniería de Materiales, Profesora Asociada, acgaviri@unalmed.edu.co

JORGE GONZALEZ

Universidad Nacional de Colombia - Medellín, Ingeniero de Minas y Metalurgia, jorge0305@hotmail.com.co

HERMES F. MORA

Universidad Nacional de Colombia - Medellín, Ingeniero de Minas y Metalurgia, hermesfernandom@yahoo.com

Recibido para revisar 15 de Mayo de 2005, aceptado 1 de Noviembre de 2005, versión final 7 de Marzo de 2006

RESUMEN: Este artículo, presenta la respuesta de dos diferentes minerales, considerados como refractarios en el proceso extractivo del Oro, a la aplicación del pretratamiento oxidante empleando microondas, como fuente de energía para generar el calor de transformación de los sulfuros a óxidos y, una vez aplicado el pretratamiento, se somete el mineral a la lixiviación con cianuro sódico, bajo condiciones convencionales, con el objeto de mostrar el efecto que dicho proceso tiene sobre los minerales o las especies minerales que causan la refractariedad. Los minerales procedentes de la mina El Roble y El Zancudo, los cuales presentan una refractariedad física y química, debido a las asociaciones del oro, su presentación y a la presencia de minerales consumidores de cianuro y oxígeno, se expusieron a las microondas dentro de una cavidad multimodo cuya frecuencia es de 2450 MHz y una potencia de 1000 W; logrando oxidar más del 90% de los sulfuros en un tiempo no superior a los 10 minutos.

Finalmente se pudo concluir a partir de la fase experimental, que la energía microonda tiene un gran potencial en el campo de la metalurgia extractiva, especialmente en las menas refractarias auríferas.

Palabras Clave: Mineral, Microondas, Refractariedad, Pretratamiento oxidante, Tostación, Oro, Cobre.

ABSTRACT: This paper presents the answer of two different minerals, considered like refractory in the extractive process of Gold, to the application of the oxidating pre-treatment using microwaves, like power plant to generate the heat of transformation of sulfides to oxides and, once applied the pre-cure, the mineral is put under the leaching with sódico cyanide, under conventional conditions, with the intention of showing the mineral effect that this process has on minerals or species that cause the refractory. The minerals coming from the mine the Roble and the Zancudo, which present a physical and chemical refractory, due to the associations of gold, their presentation and to consuming the cyanide mineral presence Cyanide and oxygenate, multiway whose 2450 frequency is of MHz and one power of 1000 W were exposed to the microwaves within a cavity; managing to oxidize more of 90% of sulfides in a time nonsuperior to the 10 minutes.

Finally it was possible to be concluded from the experimental phase, that the energy microwave has a great potential in the field of the extractive metallurgy, specially in auriferous the refractory menas.

Key words: Mineral, Microwaves, Refractory, Oxidating pre-treatment, Roasting, Gold, Receive.

1. INTRODUCCIÓN

Las microondas están siendo ampliamente usadas en el campo de las comunicaciones y el calentamiento de alimentos; sin embargo, estos no son los únicos usos que tiene la energía microonda. En los últimos años, industrias como la cerámica, construcción y metalúrgica han empezado a investigar el uso de esta tecnología para aplicarla en sus procesos, encontrando grandes ventajas; lo que ha generado un gran auge en la implementación de hornos microondas a escala industrial tanto en Norteamérica como en Europa, no obstante, el uso de esta tecnología en países subdesarrollados como el nuestro, aun no se da por la falta de conocimiento tanto de la industria como de los entes investigadores.

Las microondas son generadas por un magnetrón y pueden ser propagadas por el espacio de modo que sea absorbida o reflejada por un material distante. La frecuencia para las microondas más utilizada en el calentamiento de materiales es la de 2450 MHz debido a que es en esta frecuencia, donde se excita más rápido la molécula de agua.

El calentamiento en un horno microondas depende, a diferencia de los hornos convencionales, de las características del material y no del medio, lo que origina una clasificación de estos según, absorban, dejen pasar o sean transparentes o reflejen la energía microonda. Para el caso de los minerales absorbentes con los que se realizó el presente trabajo, la tasa de calentamiento depende de su composición, estructura interna, cantidad de masa a calentar, potencia del horno y tiempo de exposición del material a las microondas.

2. ASPECTOS GENERALES

Microondas y Refractoriedad

La refractoriedad de las menas utilizadas en esta investigación son principalmente, debidas a las siguientes causas: El encapsulamiento del oro en una matriz de sulfuros, recubrimiento de las partículas de oro, presencia de minerales

consumidores de cianuro o de oxígeno. Los pretratamientos para solucionar este fenómeno son numerosos, entre ellos se encuentran: Tostación oxidante en hornos y/o muflas convencionales, peroxidización (H_2O_2), peroxidización con aireación reforzada, oxidación con NaOH y $KMnO_4$, entre otras; sin embargo, todos estos procesos no sirven para tratar los menas en cuestión, debido a que no erradican el problema en su totalidad o bien, su implementación no es viable desde el punto de vista económico y ambiental.

El mecanismo principal para la conversión de energía microonda en calor en la mayoría de los materiales minerales es la conducción iónica; esto es, que el campo electromagnético inducido forma una corriente eléctrica en el material (o parte de él) causando pérdida Ohmica lo que produce la generación de calor. Puesto que la penetración del campo electromagnético en el material ocurre a la velocidad de luz y la inducción sólo ocurre en esos constituyentes que son receptores, la generación de calor es casi instantánea en el receptor aunque los efectos térmicos no son observados a lo largo de todo el material debido a la conducción térmica lenta.

El calentamiento de los materiales en un horno microondas depende básicamente del factor efectivo de pérdidas ϵ''_{eff} y la constante dieléctrica del material ϵ' , que a su vez depende de la frecuencia de la microonda y la temperatura del material.

La energía microondas se aplica en dos tipos de cavidades; multimodo y monomodo, siendo la principal diferencia, que en la primera se dé un campo uniforme, lo que no ocurre en la segunda, originando así que en las cavidades multimodo existan puntos que reciban más energía que otros.

En general, la tasa de calentamiento promedio de los sulfuros en un horno microondas cuya frecuencia sea de 2450 MHz y potencia de 1000 W es la que se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Tasa de calentamiento de algunos sulfuros.
Table 1. Rate of heating of some sulfides

Mineral o compuesto	Composición química	Tasa de Calentamiento [K/s]
Esferalerita	ZnS	0.89
Molibdenita	MoS ₂	0.37
Calcopirita	CuFeS ₂	11.37
Estibina	Sb ₂ S ₃	0.51
Sulfuro de plata	Ag ₂ S	0.83
Arsenopirita	AsFeS	6.25
Sulfuro de cobalto	Co ₂ S ₃	3.96
Bornita	Cu ₃ FeS ₄	6.35
Pirrotita	Fe _{1-x} S	16.43
Galena	PbS	5.93

Fuente: Hua Yixin, y www.emrmicrowave.com

3. MUESTRAS MINERALES

Las muestras sometidas a estudio, fueron:

- Un concentrado de flotación, proveniente de la Mina EL Roble, departamento del Choco, que se denominará CMR, el cual posee un $d_{80} \cong 74 \mu\text{m}$ (# 200).
- Un concentrado gravimétrico, proveniente de la mina El Zancudo, departamento de Antioquia, que se denominara CMZ, con un $d_{80} \cong 150 \mu\text{m}$ (# 100).

Las Tablas 2 y 3, presentan la composición mineralógica global, de las muestras CMR y CMZ, respectivamente.

Tabla 2. Composición mineralógica CMR.

Table 2. Mineralogic composition CMR

Especie	Contenido %
Arsenopirita AsFeS	~ 25
Pirita FeS ₂	~ 10
Calcopirita CuFeS ₂	~ 3
Ganga	~ 62

Tabla 3. Composición mineralógica CMZ.

Table 3. Mineralogic composition CMZ

Especie	Contenido (%)
Calcopirita CuFeS ₂	~ 80
Pirita FeS ₂	~ 10
Pirrotina FeS	~ 3
Ganga	~ 7

4. EQUIPOS E INSUMOS

Se usaron 2 hornos de microondas, marca LG y Toast, con una frecuencia de 2450 MHz, y una potencia 1000 W. con unas dimensiones de la cavidad de 35 X 22 X 36 cm. Los reactores usados fueron numerados así: #1. Tostador de arcilla; #2. Crisol de arcilla; #3. Crisol de sílice y #4. Escorificador de arcilla, y se ilustran en la Figura 1. Además, se utilizaron como aditivos agua y sílica gel.

Como se trabajó con cavidades multimodo el primer paso fue encontrar el punto de mayor energía de tal manera que se pudiera garantizar que en todas las pruebas el material recibiera la misma cantidad de energía por unidad de tiempo; posteriormente se realizaron ensayos con cada uno de los reactores con el objetivo de observar



cual era el que mejor se ajustaba al proceso.

Figura 1. Reactores usados

Figure 1. Reactors

5. PRUEBAS EXPERIMENTALES

El diseño óptimo del proceso se obtuvo a partir de los resultados generados en las pruebas que se detallan en la Tabla 4.

Tabla 4. Parámetros de las Pruebas

Table 4. Conditions of the Tests

Ensayo	Material	Horno	Masa [g]	Malla	Tipo de Reactor	Tiempo [s]	Aditivo (cantidad)
1	Roble	L.G.	20	200	2	210	--
2	Zancudo	L.G.	20	200	2	360	--
3	Roble	L.G.	20	200	1	360	Cal (20 g)
4	Zancudo	L.G.	20	200	1	360	Cal (20 g)
5	Roble	L.G.	20	200	3	360	--
6	Roble	Toast	20	200	4	210	--
7	Zancudo	Toast	20	200	4	360	Agua (200 ml)
8	Roble y Zancudo	Toast	20	200	4	360	Silica-gel (30g)
9	Roble	L.G.	20	325	4	180	--
10	Roble	L.G.	25	325	4	500	--
11	Roble	Toast	20	325	4	180	--
12	Zancudo	Toast	20	325	4	180	--

Como puede verse, la granulometría empleada para los minerales fue de 74 y 45 μm , lo que representó remolienda del concentrado en algunos casos.

5.1 Procedimiento

- Inicialmente se expuso el material a las microondas durante 90 s (CMR) y 180 s (CMZ)
- Luego se homogenizó manualmente esperando 180 s para que la temperatura en la muestra fuese la misma.
- Posteriormente se volvió a exponer el material durante 60 s a las microondas.
- Por último, se repitió el segundo paso por 300 s.

Para el material con una granulometría de 45 μm el procedimiento anterior se realizó una vez y para el material con un tamaño de grano de 74 μm se realizó dos veces.

5.2 Evaluación de las pruebas

- Prueba 1. Durante el ensayo fue posible observar como se calentaba la muestra al rojo vivo, y se alcanza la temperatura para comenzar el proceso de tostación, se percibió la presencia de gases SO_2 ; además, cuando llevaba aproximadamente tres minutos y medio se producía la sinterización de parte del mineral, prueba de esto es que empezaba la muestra dentro del crisol a iluminarse y se escuchaba un sonido proveniente de la antena del magnetrón similar al de un corto circuito, como cuando se realiza una soldadura de punto.
- Prueba 2. En este caso el material no logró tostarse, solamente se produjo un leve calentamiento por convección debido al aumento de temperatura de las paredes del reactor, que no fue suficiente para producir la tostación del mineral.
- Prueba 3. Se produjo sinterización parcial en algunas zonas de las muestras.
- Prueba 4. Los resultados son similares a los encontrados en la prueba anterior, con la

diferencia que se evidenciaba un menor porcentaje de material tostado.

- Prueba 5. El material no se tostó en ningún sector.
- Prueba 6. Se produjo sinterización en algunas partes de la muestra. La prueba solo duro tres minutos y medio, ya que cumplido este tiempo, la antena del microondas empezó a producir el mismo sonido que se presentó en la Prueba 1, presumiblemente por la formación de los óxidos metálicos; por lo cual, fue necesario apagar el horno para evitar daños.
- Prueba 7. Se humedeció completamente el mineral con el fin de verificar si el calor transferido por el aditivo al mineral aumentaba el coeficiente de pérdidas de los minerales mediante un incremento considerable en la temperatura. Después de terminada la prueba, se observa que el agua apelmaza la muestra dentro del reactor desfavoreciendo la absorción de las microondas.
- Prueba 8. El CMZ respondió favorablemente, ya que ayudo a la tostación del material. El CMR reaccionó con la sílica gel generando una fase de color gris con apariencia de silicato, haciendo imposible la recuperación de la sílica gel
- Prueba 9. Una vez instalado el termopar en la cavidad del microondas, tal como se recomienda en la literatura, se hizo una prueba para determinar la temperatura que alcanzaba la muestra durante el proceso. No obstante, el pirómetro utilizado tiene un tiempo de respuesta demasiado elevado, por lo que la temperatura medida podría no ser la real.
- Prueba 10. En esta prueba se buscaba dejar sinterizar completamente la muestra con el fin de establecer un perfil de temperatura; sin embargo, el objetivo de la prueba no se cumplió debido al daño del magnetrón.

- Prueba 11. En este caso se notó que pese al corto tiempo de exposición de la muestra a las microondas gran parte de esta alcanza a tostarse, en mayor medida que cuando se utilizaba el mineral pasante malla 200, evidenciando el efecto del área superficial en el calentamiento con microondas.
- Prueba 12. Se trabajó con un reconcentrado del CMZ, en el cual la ganga pasó de 62 al 10%. El resultado fue que el mineral no se tostó, pero se percibía un aumento de temperatura considerable del mismo; por lo que, se decidió darle otros cinco minutos al cabo de los cuales, se produjo una gran cantidad de gases y la tostación de gran parte de la muestra; esto evidenció que al disminuir la ganga silíceá, el proceso mejora notablemente.

5.3 Pruebas hidrometalúrgicas

Se realizaron pruebas para evaluar la extracción tanto de cobre como de oro al mineral CMR, al mineral CMZ, reconcentrado, se le evaluó su respuesta en la extracción de oro por cianuración. Estos resultados se comparan con los obtenidos antes y después de tostar en el horno microondas, para ambos concentrados así como el efecto de la tostación en las granulometrías 74 y 45 μm .

Las condiciones operacionales para la lixiviación ácida de cobre en el concentrado CMR, se presentan en la Tabla 5.

La Tabla 6, presenta las condiciones operacionales de las pruebas de cianuración a que se sometieron las muestras CMR, luego de la extracción del cobre y CMZ (reconcentrado)

Tabla 5. Condiciones operacionales
Table 5. Operations conditions

Parámetro	Valor
pH inicial	6.4
pH de trabajo	0.5 – 1.5
Porcentaje de sólidos	20 %
Cantidad de mineral a lixiviar	100 g
Agente lixiviante H_2SO_4	6 kg /ton

Tabla 6. Condiciones Operacionales
Table 6. Operations Conditions

Parámetro	Valor
pH de trabajo	10.5 – 11.0
Porcentaje de Sólidos	25 %
Concentración de NaCN	1.0 kg/ton
Cantidad de mineral	100 g

Las Figuras 2 y 3, presentan las isotermas de extracción para cobre y oro del concentrado mineral CMR, la Figura 4 presenta la extracción de oro en la muestra CMZ (reconcentrada)

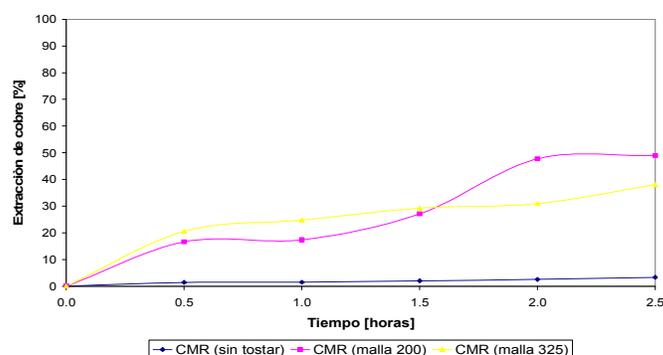


Figura 2. Extracción de cobre (CMR)
Figure 2. Copper extraction

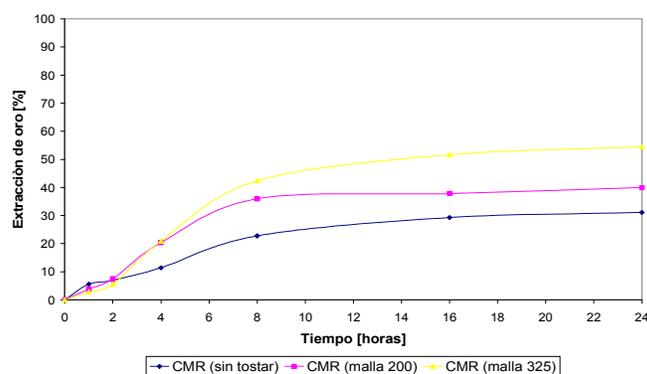


Figura 3. Extracción de oro (CMR)
Figure 3. Gold extractions (CMR)

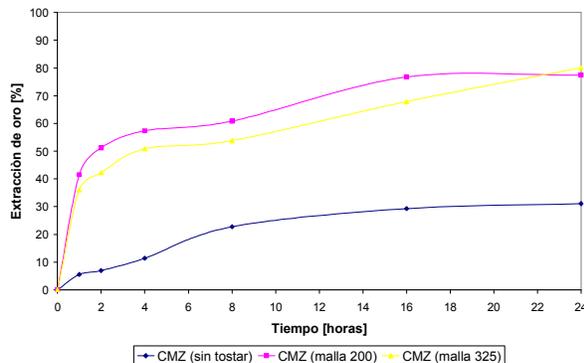


Figura 4. Extracción de oro (CMZ)

Figure 4. Gold extractions (CMZ)

Para el concentrado del Roble, CMR, el consumo de H_2SO_4 fue de 4 y 3.7 kg/ton, en las muestras sin tostar y tostadas respectivamente, el consumo de NaCN fue de 1.6 y 2.5 kg/ton en la muestra sin tostar y tostadas (pasante las mallas 200 y 325), respectivamente.

Para el concentrado del Zancudo, reconcentrado, el consumo de NaCN fue de 2.0 kg/ton en la muestra sin tostar y aproximadamente de 2.4 kg/ton en las muestras tostadas pasante malla 200 y 325 respectivamente.

6. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Mineral CMR - Mina El Roble

- La interacción entre el mineral y las microondas es muy buena, logrando la oxidación en tiempos cortos comparados con los que se presentan en un horno tipo mufla.
- El tamaño de grano es una de las variables a tener en cuenta cuando, ya que a menor tamaño de partícula el tiempo de residencia en el horno es menor.
- El porcentaje de extracción de cobre en una lixiviación ácida se aumenta notablemente, puesto que se pasa de un máximo de extracción del 4% a un 49%; sin embargo, hay que evitar que el material se sinterice, ya que esto ocasionaría que el mineral vuelva a comportarse refractariamente como sucedió en la malla 325.

- El porcentaje de extracción de oro aumenta; sin embargo, sigue siendo refractario, debido a que en el mineral hay un 50% de cobre por extraer.

Mineral CMZ – Mina El Zancudo

- La tostación de este material en un horno microondas es un pretratamiento que mejora la extracción de oro en la cianuración, ya que pasa de tener un porcentaje de extracción del 20% a un 80%, aproximadamente.
- El tiempo de residencia en el horno microondas, del mineral procedente de la mina El Zancudo es mayor que el de el proveniente de la mina El Roble, debido a que este ultimo tiene un alto contenido de calcopirita la cual presenta una alta tasa de calentamiento (11.4 K /s).
- La influencia del tamaño de grano en la tostación vía microondas en este material, es similar a la de El Roble, dando tiempo de residencia mayores conforme la granulometría aumenta.

7. CONCLUSIONES

Se evidencia en este trabajo la interacción positiva, de los sulfuros con las microondas, ya que se oxidan en un tiempo corto, entre 3.5 y 10 minutos, comparado con el necesario en una tostación convencional. Convirtiéndose así, el calentamiento por microondas, en una gran alternativa para tostar minerales refractarios de forma rápida y eficaz; sin embargo, la producción de gases SO_2 no se ve reducida, por lo que si se desea implementar este pretratamiento a escala industrial se deberá tener en cuenta en el diseño, la cámara de captación de gases.

Un incremento en la disolución de oro por el cianuro en el concentrado de El Roble, podría lograrse, siempre y cuando el cobre sea extraído previamente a la etapa de cianuración. Sin embargo, los datos obtenidos no permiten realizar una valoración económica cuantitativa. Cualitativamente hablando, basados en la experiencia adquirida y consultada de otros

países, no resulta presuntuoso asegurar que el pretratamiento con microondas es económicamente viable y con costos operacionales menores que la tostación convencional.

Las variables más relevantes, a tener en cuenta en el calentamiento con energía microondas, son: Potencia, frecuencia, masa de la muestra, tamaño de partícula de la muestra, tiempo de exposición y pérdidas dieléctricas de la muestra.

8. RECOMENDACIONES

Para posteriores trabajos se recomienda evaluar variables como la frecuencia, la masa y la potencia.

- **Frecuencia.** La frecuencia de 2.45 GHz de los hornos microondas domésticos se estableció a partir de experimentaciones que demostraron que el coeficiente de pérdidas dieléctricas del agua a esta frecuencia era el más grande. Sin embargo, es necesario realizar experimentaciones análogas con las distintas menas a tostar, para así determinar la frecuencia en la cual los sulfuros se oxidan con mayor rapidez, para así volver más eficaz el proceso.
- **Masa.** Determinar la cantidad de masa máxima para realizar un proceso a escala industrial es vital porque a partir de allí se puede dimensionar los equipos y cuantificarla la inversión inicial que debe hacer la empresa minera interesada en implementar este proceso.
- **Potencia.** Al igual que la frecuencia la potencia en los hornos microondas domésticos es fija, por lo cual para diseñar un proceso eficiente es necesario establecer una curva Potencia vs. Tiempo de residencia del material en el horno, para determinar cual es la potencia adecuada para realizar la tostación de minerales.
- Es necesario que en posteriores investigaciones se garantice el calentamiento uniforme de los materiales que tengan el mismo coeficiente de pérdidas dieléctricas, esto se logrará diseñando una metodología

para hacer que el material este en promedio en zonas de igual energía o bien utilizar un horno monomodo.

- Además se debe retomar la implementación de aditivos para lograr que se reduzca la cantidad de gases producidos; la implementación de estos aditivos se abandonó en el presente trabajo solo porque el horno microondas no estaba diseñado para trabajar tiempos demasiado largos, es decir, mayores a 12 minutos. El tratamiento de estos gases también es un proceso que se debe tener en cuenta con el objetivo de determinar cual es más eficaz y eficiente.
- Además se debe contar con otros equipos que completen el montaje de laboratorio, tales como:
 - Desviador de ondas. Con este se garantizará que el magnetrón no se dañe por un calentamiento debido a una microonda reflejada, además con este instrumento se podrá cuantificar la cantidad de energía que se aprovecha o que absorbe el mineral y la que se desperdicia o que refleja el mineral, en el proceso.
 - Pirómetro digital. Con este instrumento se podrán realizar perfiles de temperatura, con el fin de obtener el tiempo exacto en el cual el mineral es tostado y así evitar el comienzo de la sinterización.

9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] AGUILAR, Juan; ORTIZ, Ubaldo y SALAZAR, Selene. El grafito como auxiliar térmico en el procesado de espinel $MgAl_2O_4$ mediante microondas. Universidad Autónoma de Nuevo León. 1998. 42 p.
- [2] AGUILAR, Juan. Procesamiento De Materiales Por Medio De Microondas En La FIME. Ingenierías (Universidad Autónoma de Nueva León) Vol. IV, No 13, Octubre - Diciembre 2001. 32 p.
- [3] AGUILAR, Juan. Termopares Para Medir Temperaturas En Muestras Expuestas A

Microondas. Ciencia UANL (Universidad Autónoma de Nueva León) Vol. I, No 4, Octubre - Diciembre 1998. 25p.

[4] AVEZOV, A.D. Y UROSOVA, E.V. Microwave electromagnetic processing of ore concentrates for extraction of metals. Institute of Nuclear Physics Uzbek Academy of Sciences. 1997. 660 p.

[5] BOTERO, Jairo y MEJIA, Jaime. Lixiviación de un concentrado de calcopirita con sulfato férrico. Universidad Nacional de Colombia – Facultad de Minas. 1980. 63 p.

[6] BRECCIA, A. Y FINI, A. Chemistry by microwave. Revista Cubana de Química Vol XII, No 1, 2000. 162 p.

[7] BREUER, P.L. y JEFFREY, M.J. The cyanide leaching gold in solutions containing sulfide. Minerals Engineering, Vol. 13, No 10, 2000. 1097 p.

[8] CATALÁ, José; PEÑARDA, Felipe; SÁNCHEZ, David y DE LOS REYES, Elías. 7th International Conference on microwave and high frequency heating. Valencia, España. Septiembre 1999. 587 p.

[9] CORREA, Rodrigo Y GUALDRON, Oscar. Las Microondas En La Industria. Parte 1: Hipótesis Sobre Su Interacción Con La Materia. Energía y computación. Vol. VIII, No 1, Primer semestre de 1999. 75 p.

[10] CUTMORE. N.G., EVANS, T.G. y STODDARD, S.L. Low frequency microwave technique for on – line measurement of moisture. Minerals Engineering Vol. 13, No 14. 2000. 1615 p.

[11] ESCOBAR, Margarita y MORENO, Pedro. Optimización de variables de tostación de concentrados de calcopirita. Universidad Nacional de Colombia – Facultad de Minas. 1981. 133 p.

[12] FISLER, D.K y TYBURCY, J.A. Electrical properties of minerals and melts.

Mineral Physics and Crystallography. 1995. 185 p.

[13] GALEANO, Miguel Y MARULANDA, John. Efectos De Las Microondas Sobre Diferentes Tipos De Petróleos Crudos. Universidad Nacional De Colombia. Seccional Medellín. 1993. 220 p.

[14] GIORDAN, André. Las Innovaciones Tienen Siempre Una Historia. El Caso Del Horno Microondas. Un Cambio De Función. Mundo científico. No 165 Enero 1996. 33 p.

[15] GONZÁLEZ, J. E. Y HERNÁNDEZ, L. G. Procesamiento de Colas de Flotación Aurocupríferas – Mina El Roble, Choco. Universidad Nacional De Colombia Facultad de Minas. Medellín 1996 125 p.

[16] HERNÁNDEZ, Alberto. Calentamiento Industrial Con Microondas. Aspectos Teóricos. Universidad de Antioquia. Facultad de Ingeniería. Medellín 1998.

[17] HUA, Y; LIN, Z. Y YAN, Z. Application of microwave irradiation to quick leach of zinc silicate ore. Minerals Engineering 2002. 71 p.

[18] HUA, Yixin y LIU, Chunpeng. Heating rate of minerals and compounds in microwave field. Transactions of NF Society Vol. 6 No. 1 Marzo 1996. 35 p.

[19] HWANG, Jiann-Yang y SHI, Shangzhao. Oxygenated leaching of copper sulfide mineral under microwave – hydrothermal conditions. Michigan Technological University. Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering, Vol. 1, No. 2, 2002. 111 p.

[20] KINGMAN, S.W. y WHITTLES, D.N. Application of numeral modeling for prediction of influence of power density on microwave – assisted breakage. University of Nottingham. International Journal Process. 2003. 71 p.

[21] KRIEGSMANN, Gregory. Microwave heating of materials: A mathematical and

physical overview. New Jersey Institute of Technology. 2002. 54 p.

[22] MEZA, L. A. Procesos Metalúrgicos alternativos para el tratamiento de menas auroargentíferas refractarias. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, CIMEX, Medellín 1993, 392 p.

[23] MICROWAVE AND RF HEATING DRYING. The Electrification Council 1996 135 p.

[24] PEREZ, Juan y ZAPATA, José. Tostación oxidante de concentrados de calcopirita. Universidad Nacional de Colombia – Facultad de Minas. 1980. 145 p.

[25] ROSENQVIST, Terkel. Fundamentos de Metalurgia Extractiva, Editorial Limusa, México, 1987. 256 p.

[26] SALSMAN, J.B. y WILLIAMSON, R.L. Short – pulse microwave treatment of disseminated sulfide ores. Minerals Engineering, Vol. 9, No. 1. 1996. 43 p.

[27] SHUEY, Scott. Microwaves in mining. Engineering & Mining Journal. Febrero 2002. 22 p.

[28] TRANQUILLA, J.M; LaRoche, W. Design and Operation of a Microwave Pilot Plant for Calcining Refractory Gold Ores and Concentrates. [En línea]. EMR Microwave Technology Corp. 1998. <<http://www.emrmicrowave.com/paper/Randol98-1.pdf>>.

[29] TRANQUILLA, J.M. *Mineral extraction and the use of microwaves*. [En línea]. EMR Microwave Technology Corp. <<http://www.emrmicrowave.com/paper/cim97.html>>. [Consulta: julio 17 de 2002].

[30] YIANATOS, J.B. y ANTONUCCI, V. Molybdenite concentrate cleaning by Copper sulfation activated by microwave. Minerals Engineering Vol.14. No.11. 2001.1411 p.

[31] YANNOPOULOS, J. C. The extractive Metallurgy of Gold, Van Nostrand Reinhold, Nueva York, 1991. 334 p.