

Capítulo 2

Caracterización por Difracción de Rayos X de Fluorapatita y de Residuos no Magnéticos del Proceso de Concentración Magnética de Fe

J.A. Sánchez-Lázaro, N. Piedad-Sánchez, J.L. Cadena-Zamudio, E. González-Partida, P. Bartolo-Pérez, I.M. de la Garza-Rodríguez, I.A. Facundo-Arzola, M.G. Rosales-Sosa, K. Flores-Castro



Caracterización por Difracción de Rayos X de Fluorapatita y de Residuos no Magnéticos del Proceso de Concentración Magnética de Fe

1. Introducción

Actualmente la fluorapatita es un mineral de ganga en la mina de Fe de Cerro del Mercado, cuyo uso económico es poco significativo. Los residuos del proceso de concentración de Fe contienen un alto contenido de fósforo, el cual no está siendo utilizado por la empresa de la mina de Cerro del Mercado.

Con el objetivo de determinar si la fluorapatita, presente en la mina de Cerro del Mercado, es susceptible de un proceso de beneficio económicamente rentable, se requiere obtener sus propiedades químicas y físicas, así como las trazas de elementos que contiene.

En este trabajo, se describe la caracterización por el método de difracción de rayos X (DRX) de la fluorapatita de muestras recolectadas en diferentes etapas del proceso industrial de concentración de Fe a partir de la magnetita-hematita.

Debido a la importancia actual que tiene el fósforo en la industria moderna, se justifica la caracterización detallada de la fluorapatita para investigar su potencial aprovechamiento integral, y coadyuvar a su separación del proceso industrial, optimizando la recuperación ideal de Fe en el Cerro del Mercado.

2. Antecedentes

La fluorapatita se ha encontrado en México en múltiples yacimientos pertenecientes a diversas tipologías^[1,2]. Desde el punto de vista de la calidad de sus cristales, la localidad más sobresaliente es la mina de hierro de Cerro del Mercado (nombrado en honor del capitán español Ginés Vázquez del Mercado, quien lo visitó a fines de 1552), situada hacia las afueras de la ciudad de Durango.

En este yacimiento, la fluorapatita es el principal mineral de ganga y representa un problema tecnológico en el beneficio del hierro (el contenido máximo permisible de fósforo en el concentrado final es de 0.05% en peso).



Figura 1. Ubicación mina del Cerro del Mercado.

El yacimiento de Cerro del Mercado constituye buena parte de un cerro aislado de mediana altura que destaca sobre la gran llanura denominada Valle de Guadiana. Sus coordenadas geográficas son $24^{\circ} 02'48''$ N y $104^{\circ} 40'18''$ W, y su altitud es de 1980 msnm^[2] (Figura 1).

El depósito de hierro de Cerro del Mercado consiste en diversos cuerpos masivos de disposición subhorizontal encajonados en rocas volcánicas ácidas^[3]. Dichos cuerpos presentan texturas granulares y brechadas, en los que la fluorapatita se asocia a calcita, calcedonia, hematites, magnetita y diópsido-hedenbergita. La mineralización está claramente vinculada a procesos magmáticos y pertenece a la tipología IOCG (Iron Oxide Copper–Gold Deposits)^[4,5]. La explotación de hierro en el yacimiento de Cerro del Mercado inició en el año 1828. El periodo de mayor actividad extractiva fue el comprendido entre los años 1934 y 1986, durante los cuales operó la Compañía Fundidora de Fierro y Acero de Monterrey. Después de su cese, la mina reabrió en 1996, año en que fue adquirida por el Grupo Acerero del Norte^[2].

El yacimiento de Cerro del Mercado sobresale a escala mundial por la abundancia y tamaño de los cristales de fluorapatita (hasta 10 cm de longitud)^[1], así como por su diafanidad, belleza y perfección. Por su homogeneidad y pureza, estos cristales se utilizan como estándar en las técnicas de datación por trazas de fisión y por (U–Th)/He^[6,7]. La tonalidad amarillenta de la fluorapatita propia de algunos cristales de Cerro del Mercado no es muy común^[2].

En los cristales de Cerro del Mercado, la coloración amarillenta se atribuye a su elevado contenido en Nd, de hasta 0.45% en peso de Nd₂O₃^[8].



La apatita tiene la fórmula general $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{X}_2$ donde X es comúnmente F (fluorapatita, FAp), OH (hidroxiapatita, OHAp), o Cl (cloroapatita, ClAp). La estructura de la apatita es muy tolerante a las sustituciones, vacancias o soluciones sólidas, por ejemplo, la X puede ser remplazada por $\frac{1}{2}\text{CO}_3$ o $\frac{1}{2}\text{O}$; el Ca puede ser remplazado por Sr, Ba, Pb, Na o vacancias; y el PO_4 por HPO_4 , AsO_4 , VO_4 , SiO_4 o CO_3 .

La microestructura de la apatita, mostrada en la Figura 2, está definida por una celda hexagonal compacta con un grupo espacial P63/m y con parámetros de red aproximados de $a=9.37 \text{ \AA}$ y $c=6.88 \text{ \AA}$, su gravedad específica es de 3.1 a 3.2 y su dureza es de 5 en la escala de Mohs^[9,10].

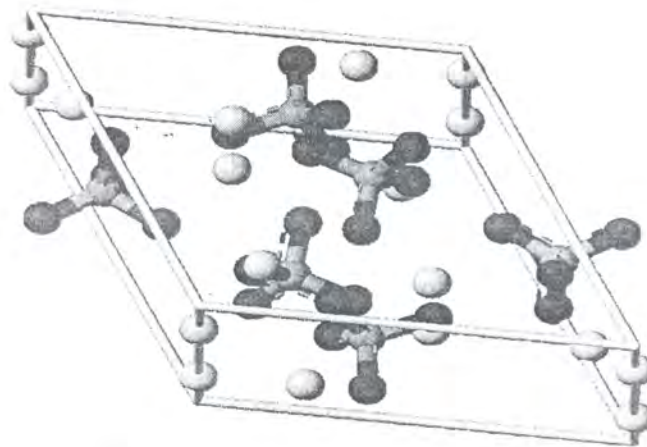


Figura 2. Celda unitaria de fluorapatita.

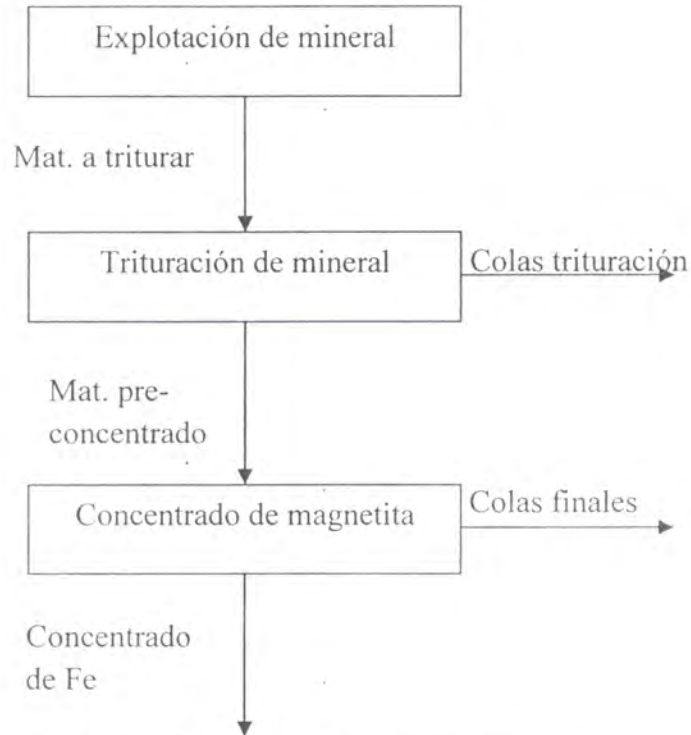
3. Metodología experimental

3.1 Reconocimiento de la mina de Cerro del Mercado y toma de las muestras

En coordinación con personal del *Grupo Acerero del Norte (GAN)* y de la *Facultad de Metalurgia (FM-UAdeC)*, se estableció realizar una visita a la mina de cerro del Mercado, Durango, con el objetivo de conocer el proceso de concentración de Fe a partir de la magnetita desarrollado en dicha planta, y muestrear fluorapatita para llevar a cabo la caracterización por DRX.

La visita se realizó del 8 al 11 de agosto del 2011, y durante la estancia en las instalaciones de la mina de Cerro del Mercado, se reconocieron las tres áreas de trabajo principales de la mina (Figura 3), las cuales son:

- Área de explotación de mineral.
- Área de de trituración de mineral.



c) Área de concentración de Fe a partir de la magnetita.

Figura 3. Proceso actual de mina Cerro del Mercado.

La recolección de muestras de diferentes puntos del proceso se enlista en la Tabla 1.

Tabla 1. Muestras tomadas en la mina de Cerro del Mercado.

Área de trabajo	Identificación	Observaciones
Explotación de mineral	Cuerpo marmaja sur, Nivel 1860	n/a
Explotación de mineral	Cuerpo marmaja, Nivel 1870	n/a
Concentrado de Fe	Concentrado final de Fe	Material de embarque
Concentrado de Fe	Colas finales de planta	Residuos finales, sólidos obtenidos por evaporación de agua
Concentrado de Fe	Prueba piloto de concentración de fluorapatita	La empresa realiza una prueba piloto para la concentración de minerales con alto contenido de fósforo.



3.2 Tratamiento de las muestras

Las 5 muestras fueron trituradas con un molino de bolas hasta tamaño de partícula menor a 100 μm . Posteriormente fueron trituradas en un mortero de ágata, hasta un tamaño de partícula menor a 75 μm .

3.3 Caracterización por DRX.

Para el análisis de difracción de rayos X (DRX) se utilizó un equipo de difracción de rayos X de polvos Bruker D8 ADVANCE (tiempo de paso 1 s, tamaño de paso 0.020°, 5°-80°, 2 θ).

4. Resultados y discusión

La presencia de fluorapatita en las diferentes muestras analizadas por DRX fue confirmada (ver Figuras 4-6), además de otros compuestos como magnetita, hematita, calcita y cuarzo, mostrando comportamientos similares de concentración en los bancos 1860 y 1870 del área de extracción denominada Marmaja.

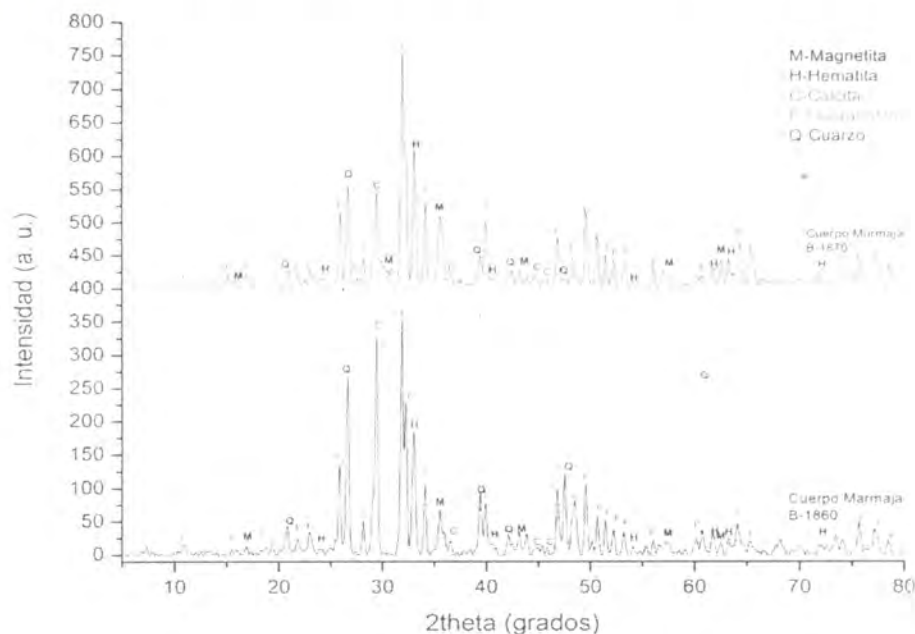


Figura 4. Análisis de DRX Cuerpo marmaja sur, B-1860 y B-1870

El proceso de concentración de Fe de la mina de Cerro del Mercado, elimina la mayoría de las impurezas presentes en la mena de magnetita, dejando solo cantidades pequeñas de hematita, apreciables en la Difracción de Rayos X (Figura 5).

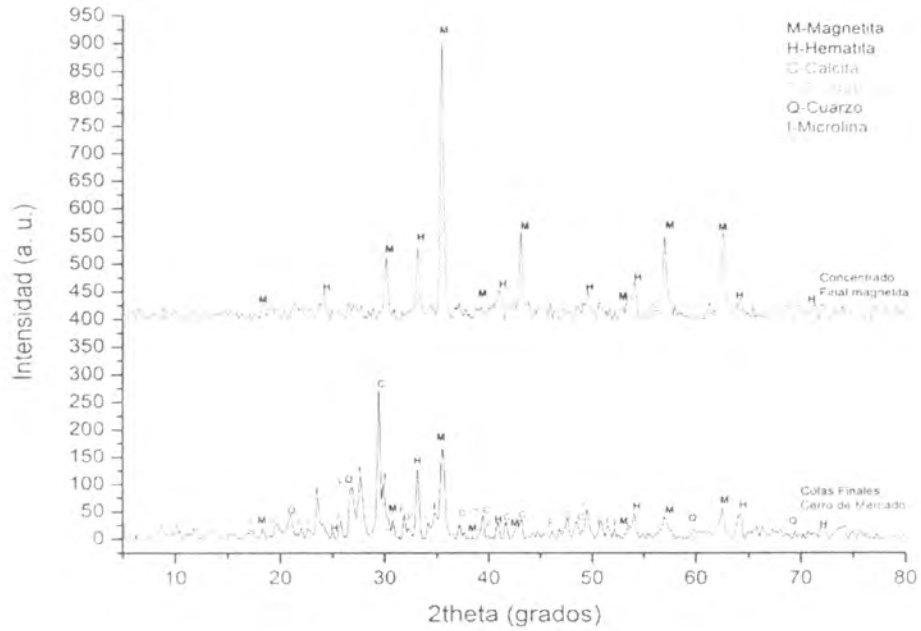


Figura 5. Análisis de DRX proceso concentrado de magnetita

La prueba piloto que la empresa de la mina de Cerro del Mercado, realizó para la concentración de fluorapatita, demuestra su efectividad al concentrar este mineral y algunos residuos de calcita (Figura 6).

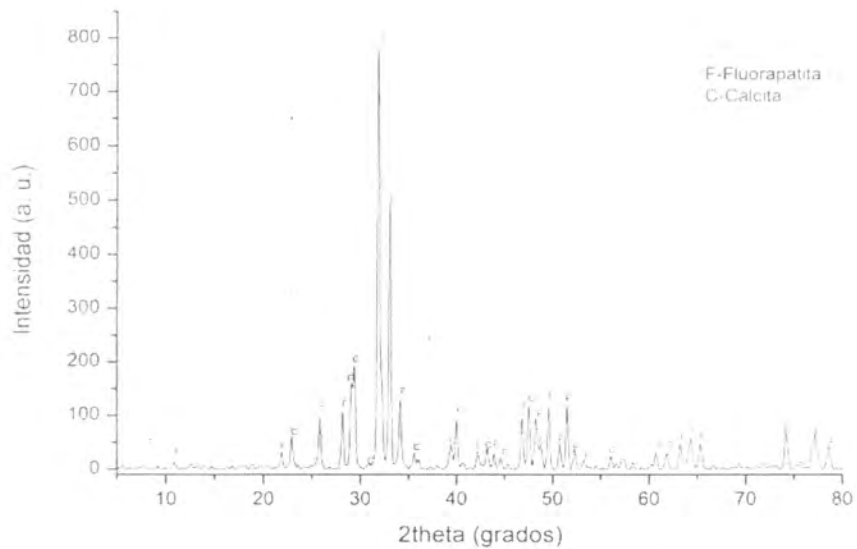


Figura 6. Análisis de DRX prueba piloto concentrado de fluorapatita.



Debido a la naturaleza del proceso de la mina de Cerro del Mercado, el punto para la recuperación de un concentrado de fluorapatita es a la salida de las colas del proceso de concentración de Fe a partir de la magnetita-hematita.

5. Conclusiones

Los resultados obtenidos sirven para recabar información detallada de los minerales presentes en la mina de Cerro del Mercado, donde se confirmó la presencia de la fluorapatita, acompañada de cantidades menores de calcita, hematita, magnetita y cuarzo. Esta información puede ser complementada con estudios de ICP-MS, Espectroscopía de Absorción Atómica o Fluorescencia de Rayos X, coadyuvando a la posible planeación para la recuperación económica de la fluorapatita.

Considerando que la prueba piloto realizada por la mina de Cerro del Mercado, y confirmada con los resultados de DRX, arroja calcita además de fluorapatita, debe considerarse la posible afectación de este mineral en el proceso de recuperación de los concentrados de fluorapatita.

Finalmente, la caracterización de DRX sugiere que la mayor concentración de fluorapatita se da en la salida de las colas del proceso de concentración de Fe.

6. Agradecimientos

Los autores agradecen las facilidades para la recuperación de muestras a los líderes de Minera del Norte S.A. de C.V., especialmente al C.P. José Guadalupe GARCÍA. Asimismo, se agradece a los directivos Dr. Rafael ALEXANDRI RIONDA, M.C. Francisco YAÑEZ MONDRAGÓN, Ing. José de Jesús RODRÍGUEZ SALINAS e Ing. Luciano HERNÁNDEZ NORIEGA del Servicio Geológico Mexicano por su apoyo en la parte analítica. Sánchez-Lázaro y Piedad-Sánchez agradecen por el apoyo para realizar este trabajo al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, y a las autoridades de la Facultad de Metalurgia y de la Coordinación de Estudios de Posgrado e Investigación de la Universidad Autónoma de Coahuila, especialmente, al Dr. Edgar BRAHAM PRIEGO. Finalmente, Sánchez-Lázaro agradece a las autoridades del Instituto Nacional del Carbón en Oviedo, España, especialmente a la Dra. Angeles GÓMEZ BORREGO y a la Dra. Mercedes DÍAZ SOMOANO, por la asesoría durante el desarrollo del trabajo.

Referencias Bibliográficas

1. Panczner, W. (1987). Minerals of Mexico. Van Nostrand Reinhold Company , 459.
2. Cruz Ocampo, J. C., Canet, C., & Peña García, D. (2007). Las Gemas de México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana 59 (1), 9-18.
3. Corona-Esquivel, R., Tapia-Zúñiga, C., Henríquez, F., Tritlla, J., Morales-Isunza, A., Levresse, G., y otros. (2009). Geología y mineralización del yacimiento de hierro Cerro de Mercado, Durango. Geología Económica de México, 529-535.



4. Lyons, J. I. (1988). Volcanogenic iron oxide deposits, Cerro de Mercado and vicinity, Durango, Mexico. *Economic Geology* 83, 1886-1906.
5. Pollard, P. J. (2000). Evidence of a magmatic fluid and metal source for Fe-oxide Cu-Au mineralization, en Porter, T.M. *Australian Mineral Foundation* 1, 27-41.
6. Jurgeit, M., 2001, Fluorapatit und seine Begleitminerale vom Cerro del Mercado in Durango, Mexiko. *Mineralienwelt* 4, p. 56-61.
7. McDowell, F. W., McIntosh, W. C., & Farley, K. A. (2005). A precise ^{40}Ar - ^{39}Ar reference age for the Durango apatite (U-Th)/He and fission-track dating standard. *Chemical Geology* 214, 249-263.
8. Cruz-Ocampo, J. C. (2000). Caracterización mineralógica de roca huésped y zona de mineralización y propiedades magnéticas del yacimiento del Cerro del Mercado, Durango, México. Facultad de Ingeniería, UNAM, Tesis Profesional, 73 p.
9. Elliot, J., Wilson, R., & Dower, S. (2002). Apatite Structures. JCPDS-International Centre for Diffraction Data, 45.
10. Alva-Valdivia, L. M., Goguitchaichvili, A., Urrutia-Fucugauchi, J., Caballero-Miranda, C., & Vivallo, W. (2001). Rock-magnetism and ore microscopy of the magnetite-apatite ore deposit from Cerro de Mercado, Mexico. *Earth Planets Space* 53, 181-192.