

ANÁLISIS MINERALÓGICO EN LA INDUSTRIA MINERA

HUGO CANDIOTTI *

RESUMEN

El análisis mineralógico, es una técnica de investigación geológica de laboratorio, dedicada a la obtención de datos mineralógicos necesarios para la evaluación y aprovechamiento de las materias primas-minerales.

En el presente trabajo se describen brevemente la importancia y las aplicaciones del análisis mineralógico durante las diferentes etapas de desarrollo de un yacimiento mineral. Del mismo modo, se señalan algunos ejemplos de estudios geológicos y metalúrgicos desafortunados que no contaron con la asistencia oportuna de un adecuado estudio mineralógico.

1. INTRODUCCION

El abastecimiento adecuado de materias primas minerales a las diferentes ramas de la industria, la creciente demanda mundial de metales y la tarea cada vez más difícil de descubrir nuevos depósitos minerales, hacen perentorio el empleo de nuevas técnicas de investigación geológica, para poder aprovechar con mayor eficiencia nuestros recursos minerales.

El análisis mineralógico, es una de estas técnicas dedicadas a la identificación de los minerales y al conocimiento detallado de sus propiedades físicas y químicas, cuya asistencia es de vital importancia en las diferentes etapas de desarrollo de un proyecto minero.

Por lo expuesto anteriormente y conciente de la importancia del análisis mineralógico para el desarrollo racional de nuestra minería se ha elaborado el siguiente trabajo con la finalidad de exponer en forma breve y didáctica, el apoyo y las ventajas de un estudio mineralógico detallado en la solución de los diferentes problemas que se presentan durante las fases de exploración, desarrollo y producción de un yacimiento mineral.

* MINERO PERU, Sección Petromineralogía.

2. METODOS DE ANALISIS MINERALOGICO

Además del estudio microscópico de minerales, existen otros métodos complementarios de investigación; entre los principales podemos citar los siguientes: Difracción de Rayos X, Análisis Espectrográfico, Microsonda Electrónica, Análisis Térmico Diferencial, Espectrofotometría de Absorción Atómica.

La observación microscópica, generalmente, es el primer paso en toda investigación mineralógica, debido a que permite realizar estudios rápidos en base a la observación y comparación de las propiedades físicas de los minerales. Las otras técnicas, en cambio, determinan las características físicas y/o químicas, que no pueden ser determinadas ópticamente, y permiten de este modo, la realización de estudios especiales orientados al conocimiento integral de uno o más minerales.

3. EL ANALISIS MINERALOGICO EN LA EXPLORACION DE YACIMIENTOS MINERALES

Es importante que la información referente a la mineralogía, relaciones texturales, tamaño de partículas, distribución de elementos y las asociaciones mineralógicas, deben ser conocidas tan pronto como sea posible durante la etapa de exploración de un yacimiento mineral. Esta información además de permitir a los geólogos de exploración interpretar la génesis del yacimiento y programar los trabajos para la evaluación del mismo, servirá de apoyo en las etapas subsiguientes, para la solución de dificultades potenciales en el beneficio de los minerales y para las consideraciones económicas necesarias en el cálculo de la inversión de capitales requeridos (ver Fig. No. 1).

La mayor parte de la información mineralógica necesaria en esta etapa, puede ser obtenida mediante estudios microscópicos; pero en ciertos casos, será necesario el uso de otras técnicas de análisis mineralógicos para la rápida obtención de datos específicos y prácticos.

Muchos prospectos mineros interesantes fueron descartados en todo el mundo, debido principalmente a la falta de una buena preparación en mineralogía de las personas que descubrieron o examinaron dichos prospectos.

Inclusive, un geólogo de bastante experiencia deberá tener sólidos conocimientos en mineralogía, para poder reconocer y/o sospechar la presencia de un mineral importante y, solicitar la realización de investigaciones adicionales en un laboratorio de análisis mineralógico.

A continuación, a manera de ilustración, se citan varios ejemplos sobre resultados desafortunados, debido principalmente a la falta de una

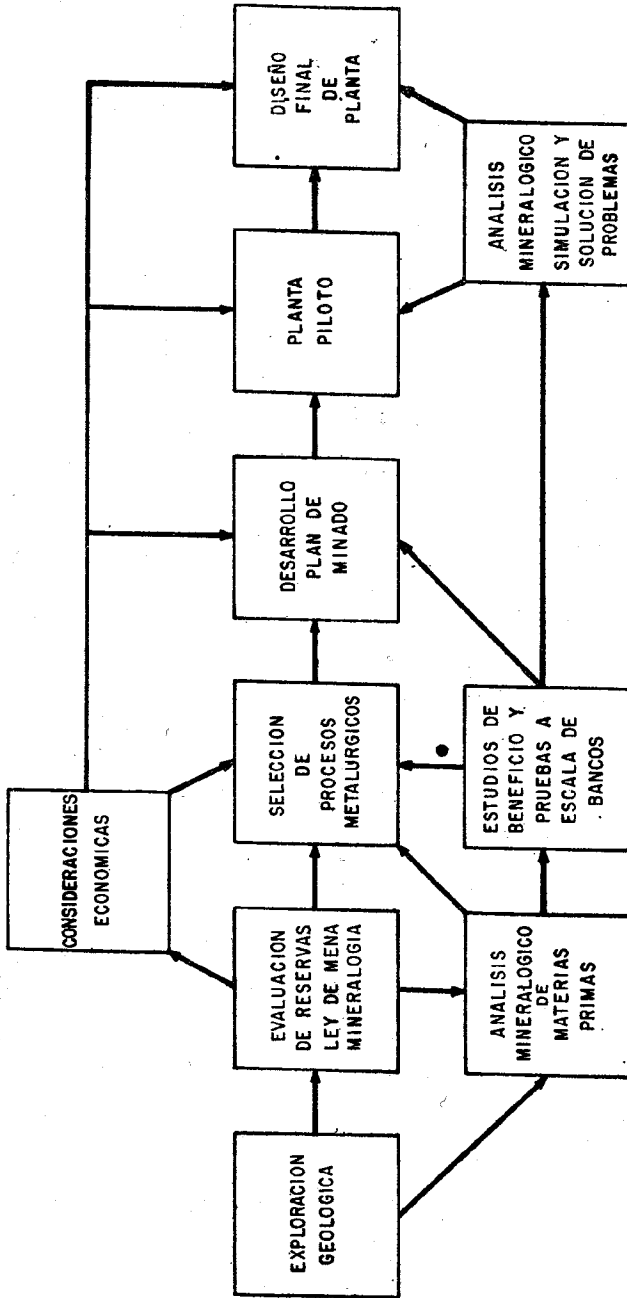


Fig. 1. Exploración y desarrollo de un yacimiento mineral. Tomado de Mining Journal Congress (1976). J. C. Agarwal y Otros (1976).

adecuada investigación mineralógica, durante la fase de reconocimiento y exploración de una propiedad minera:

- Durante muchos años, en que el mundo estaba dedicado a la búsqueda de una fuente de aluminio económica y fácilmente explotable, el inmenso depósito de bauxita de Weipa (Australia) permaneció inexplorado por mucho tiempo, debido a que fue considerado como una mena de hierro pisolítico y laterita. Sólo en el año 1955 se descubrió que la mena consistía de bauxita de un gran potencial económico.
- Las vetas de uranio de la mina El dorado (Canadá), fueron originalmente ignoradas por los geólogos de exploración, quienes no prestaron atención al mineral de uranio pechblenda de color negro recubierto por una capa de óxido de color amarillo anaranjado característico, debido a que estuvieron dedicados a la prospección de cobre, cobalto y oro. Más tarde, un observador acucioso se volvió rico con su descubrimiento de uranio.
- La única mina de tungsteno, en el territorio nor-este del Canadá, fue originalmente abandonada por una compañía minera dedicada a la exploración de cobre, debido a que los valores de cobre encontrados fueron bajos y el mineral de ganga pesado y de color grisáceo, identificado posteriormente como scheelita (WO_4Ca) en el laboratorio de mineralogía, no fue tomado en cuenta.
- En el área de Gravelotte, al noreste de Sud Africa, una pegmatita asociada con el granito de Mashishimala fue originalmente explotada por tantalita-Colombita ($(Fe-Mn) Nb_2 O_6 - (Fe-Mn) TA_2O_6$).
El material de ganga, de color gris verdoso, que no contenía mayormente estos minerales fue depositado como desmonte. Posteriormente un hombre de negocios, aconsejado por un mineralogista, compró el demonte debido a que la ganga estaba constituida mayormente por berilo $Be_3Al_2 (Si_6O_{18})$.

Otro ejemplo sobre la importancia del análisis mineralógico en la investigación detallada de algunos minerales específicos, es el siguiente:

- El análisis químico de una muestra masiva de pirrotita indicó un contenido de 1% de Ni y 1% de Cu. Ningún otro mineral aparte de calcopirita podía observarse en la muestra a simple vista. Por lo que, el geólogo de exploraciones envió la muestra al Laboratorio de Petromineralogía para los análisis mineralógicos correspondientes, con la finalidad de:

1. Determinar la naturaleza de la ocurrencia de níquel en la muestra. En especial para determinar cuánto níquel se encontraba en solución sólida (no recuperable) y qué cantidad estaba presente como una fase separada (recuperable).
2. Predecir la ley máxima del concentrado de níquel que podría ser recuperable.
3. Identificar otros minerales de cobre en la muestra.
4. Predecir la ley máxima de cobre que podría ser recuperable.
5. Determinar que elementos menores asociados podrían ser recuperados como subproductos.
6. Estudiar los diferentes tipos de intercrecimiento de minerales, texturas y tamaño de partículas que podrían afectar la concentración de los minerales valiosos.

La mayoría de estos datos podrían ser obtenidos con un simple estudio microscópico; pero algunos, como por ejemplo el contenido de níquel de la pirrotita, necesita el uso de otras técnicas más sofisticadas de análisis mineralógico.

El estudio de la muestra dio como resultado que el níquel ocurría como pentlandita — $(\text{Fe}, \text{Ni})_9 \text{S}_8$. El análisis semicuantitativo de la pirrotita $(\text{Fe}_{1-x}\text{S})$, mostró que este mineral contenía 0.2% de níquel. Por lo tanto, como la mena contenía 1% de Ni, el 20% de Ni se encontraba en la pirrotita y el 80% de pentlandita. Consecuentemente, se esperaba una recuperación máxima del 80% de Ni mediante concentración de la pentlandita por flotación.

La ley máxima del concentrado de Ni, sólo podrá obtenerse, si se logra un producto conteniendo únicamente pentlandita; en tal caso, la ley del concentrado estará relacionada al contenido de Ni de la pentlandita. Datos publicados sobre la composición de la pentlandita muestran que su contenido de Ni es variable, pero que generalmente llega al 34%.

El análisis semicuantitativo de la pentlandita estudiada, mostró que ésta sólo contenía 22%; pero que además, contenía 10% de cobalto. Consecuentemente, la máxima ley del concentrado, que se obtendrá de la mena sería de 22% de Ni. En la práctica, esta ley casi nunca se obtiene, debido a que el concentrado de Ni se encuentra afectado por impurezas.

Tanto los estudios microscópicos y los otros métodos de investigación mineralógica, mostraron que la calcopirita (Cu Fe S_2) es el principal mineral de cobre. Determinándose también la presencia de cubanita $(\text{Cu Fe}_2 \text{S}_3)$, la cual contiene menor cantidad de cobre que la calcopirita (alrededor de 22%, en comparación con 34% de la calcopirita); por tanto, se esperaba obtener un concentrado de cobre con una

ley menor que la de la calcopirita, debido a la presencia de cubanita en la mena. En la operación de planta, el concentrado de cobre estará casi siempre diluido por otros minerales, que harán bajar más la ley de cobre.

Por otro lado, el análisis de la pentlandita mostró que este mineral contenía además cobalto en cantidad anormal, el cual podría ser recuperado como subproducto de los concentrados de níquel.

El estudio de tamaño de partículas y sus intercrecimientos servirían para mejorar el grado de concentración de los minerales valiosos.

4. EL ANALISIS MINERALOGICO EN LA MINERALURGIA Y METALURGIA EXTRACTIVA

Aunque las aplicaciones del análisis mineralógico en metalurgia son múltiples y variadas, estas pueden ser resumidas en dos: en la investigación mineralógica de menas y en el estudio de los productos provenientes del tratamiento de minerales.

Durante la fase de desarrollo de una mina generalmente se presentan algunos problemas de carácter metalúrgico. En esta etapa, es de vital importancia el conocimiento integral de los minerales que constituyen una mena, lo cual servirá de apoyo al metalurgista para la selección de un tratamiento metalúrgico adecuado para el beneficio de las menas.

El análisis químico de una mena, aparte de indicar la cantidad de elementos presentes, no proporciona información sobre las características principales de cada uno de los minerales que constituye la mena.

A continuación se da un ejemplo de como un metalurgista puede ser desorientado en sus deducciones, cuando sólo se base en resultados de análisis químico.

- Una muestra de óxido de cromo, producido artificialmente en una fundición, fue enviada al metalurgista para su estudio. El análisis químico de la muestra indicó como componentes mayores cromo y silicio, después de una cuidadosa evaluación de la información disponible y las condiciones a las que fue sometido el material en la fundición, el metalurgista llegó a la conclusión de que la muestra era un silicato de cromo artificialmente producido. Posteriormente se le comunicó que, a excepción de uvarovita, un granate de calcio y cromo $Ca_3Cr_2(SiO_4)_3$, el cual puede ser producido artificialmente bajo condiciones cuidadosamente controladas de temperatura y presión, el cromo y el silicio no se combinan en la naturaleza; por lo tanto

el material en mención resultaría completamente extraño e inesperado. Posteriormente el estudio por difracción de rayos X, mostró que el producto consistía verdaderamente de una mezcla de cristobalita (SiO_2) y óxidos de cromo (CrO , Cr_2O_3 y Cr_2O_5).

La identificación de minerales puede ser una tarea complicada, si se considera que existen algo más de 2,500 especies minerales conocidas hasta la fecha y que además estas especies han sido subdivididas en 10,000 a 15,000 variedades cada cual con un nombre específico. Esta formidable lista, incluye a cierto número de minerales que ya han sido descartados como un mineral definido; sin embargo, nuevos minerales se suman a la relación continuamente.

Una vez que el mineral ha sido identificado, se consulta la literatura respectiva, para conocer su composición química, propiedades físicas y otros datos relevantes para el metalurgista; pero en algunos casos, las propiedades importantes sólo son determinadas por el análisis mineralógico.

Las propiedades físicas de los minerales son de gran importancia para el metalurgista (especialmente en mineralurgia). La dureza, brillo y fracturamiento afectan el comportamiento de las menas.

La forma de las partículas de mineral es importante para su separación por medios físicos; la diferencia en la gravedad específica de los minerales es la base de la separación gravimétrica; el color y la reflectividad se usan como control en el proceso de selección manual o electrónica; las propiedades magnéticas determinan la separación diamagnética y paramagnética de minerales; la radioactividad es de primera importancia en los procedimientos de selección radioactiva; las propiedades de la superficie son importantes en la flotación; y la resistencia eléctrica de los minerales permite su recuperación electrostática.

Tales propiedades son extremadamente variables, por ejemplo el cuarzo puede variar de color, de incoloro a gris oscuro y; la esfalerita entre amarillo, verde, pardo y pardo oscuro, dependiendo del contenido de hierro, cadmio, galio, indio, etc.; el rutilo y el zircón puede ser magnéticos o no magnéticos, dependiendo de la cantidad y naturaleza de las inclusiones magnéticas o paramagnéticas.

Algunas veces se encuentra cantidades económicas de mineral como gramos individuales en los depósitos de playa; pero la mayor parte de las menas, son compactas y exhiben una variedad de texturas. Aunque una mena puede estar constituida por un solo mineral, la mayoría de las menas contienen de 3 a 20 especies minerales.

La textura de una mena es de mucha importancia para el metalurgista debido a que el grado de liberación de los minerales durante la

etapa de molienda, depende del modo en que los diferentes minerales se encuentran asociados en la mena, el tamaño de cada grano de mineral, las características de los bordes de los mismos, clivajes, fracturas y estado físico de los minerales (si se encuentran alterados o frescos). Una información detallada sobre estas propiedades físicas es de mucho valor para evitar la sobremolienda y la formación de lana, que podría hacer difícil o imposible la concentración de los minerales. Donde la molienda de la mena es deficiente, la ley del concentrado disminuirá debido a la presencia de los minerales de ganga adheridos a los minerales de mena.

En resumen, en la etapa de desarrollo de un yacimiento mineral, el análisis mineralógico ayuda al metalurgista en la solución de problemas mineralógicos relacionados con el tratamiento de minerales (minería). Los problemas mineralógicos que se presentan, se sintetizan generalmente en las siguientes preguntas:

1. ¿Por qué el concentrado tiene menor ley que lo estimado?
2. ¿Por qué hay una deficiente separación de valores de metal en los diferentes productos de concentración?
3. ¿Cuáles son las causas de la pérdida de metal en los colas?

Las dos primeras preguntas pueden ser generalmente respondidas por estudios microscópicos convencionales; pero la tercera, puede ser algo difícil de responder especialmente cuando la pérdida se trata de metales preciosos que se encuentran en cantidades trazas en las menas, como se muestra en el siguiente ejemplo.

El análisis químico de las colas, producidas durante las pruebas de funcionamiento de una concentradora que procesó minerales de plomo, zinc y plata, arrojó 1 Oz. de Ag por tonelada. Por tal razón se envió las muestras de cola al laboratorio de investigaciones mineralógicas para determinar las causas de la pérdida de plata.

La mena del cual procedían las muestras era esencialmente primaria por lo que se sospechó que la pérdida de plata estaría asociada con algún sulfuro. El análisis químico de un concentrado de minerales pesados obtenido de las muestras, indicó un contenido de 7 Oz de Ag por tonelada, de modo que las investigaciones se dedicaron a este producto.

Después de investigaciones mineralógicas tediosas, se determinó que la mayor parte de los minerales pesados estaba constituida por baritina, galena y piritita y que la plata estaba presen-

te en la estromeyrita ($\text{Cu}_2\text{S Ag}_2\text{S}$). Además este último mineral, ocurría como minúsculas inclusiones dentro de la pirita.

Por lo tanto, como la mayor parte de la plata ocurría en granos muy pequeños (generalmente $< 5 \mu$), no era factible moler el producto lo suficientemente fino para lograr la liberación de estromeyrita. Consecuentemente, no existe un tratamiento físico práctico que pueda permitir la recuperación de estos valores de plata.

El análisis mineralógico, es también de gran ayuda para mejorar el rendimiento de una planta metalúrgica en operación.

Por el examen mineralógico de concentrados, productos intermedios y colas producidas por las plantas, el mineralurgista puede proporcionar información referente al grado de pureza de los concentrados y acerca de las causas que ocasionan la pérdida de minerales valiosos en los productos intermedios y en las colas.

Los siguientes ejemplos pueden ilustrar como tales pérdidas pueden deberse a una molienda incorrecta, a una deficiente liberación y a la ocurrencia de una cubierta en los minerales:

- a. La presencia de rutilo (magnético) entre los minerales no magnéticos separados, debido a la cubierta de óxido de fierro y/o a la presencia de minúsculas inclusiones de ilmenita en rutilo que le imprimen un comportamiento no magnético.
- b. Inclusiones microscópicas de oro no recuperables, pueden estar presentes dentro de granos de cuarzo en los productos intermedios y en las colas.

El hidrometalurgista, aunque está interesado en las mismas propiedades de los minerales que el mineralurgista, está familiarizado con el tratamiento de los minerales que consumen ácido o son refractarios a éstos u otros agentes de lixiviación. Muchas de las propiedades de los minerales, anteriormente mencionadas, pueden parecer superfluas para el hidrometalurgista que está interesado en la molienda de una mena para sumergirla en ácido u otros productos químicos apropiados. Sin embargo, si no toma en consideración las propiedades físicas de los minerales, las soluciones lixiviantes no podrán llegar hasta el mineral o metal por extraer o, la acción físico-química entre las menas y las soluciones de lixiviación, puede comprometer totalmente todo el proceso de extracción.

En muchos casos los minerales de ganga son tan importantes como los minerales económicos; debido a que ellos pueden afectar todo el

proceso de recuperación, por ejemplo las calizas u otros carbonatos, pueden consumir grandes cantidades de ácido durante el procesamiento químico de menas.

El pirometalurgista, aunque está interesado principalmente en la composición química de los minerales, generalmente necesita información sobre la proporción de los elementos en algunos minerales específicos. Por ejemplo, la relación de cromo y hierro en la cromita y de titanio y hierro en magnetita. También requieren información, sobre la estructura y propiedades físicas de las escorias e impurezas en los productos finales.

Todas estas informaciones requeridas por el pirometalurgista pueden ser convenientemente suministradas por el análisis mineralógico.

5. CONCLUSIONES

1. El concepto integral de la utilización de los minerales, necesita de la concurrencia del trabajo en equipo: El geólogo de campo debe descubrir, reconocer y evaluar una mena; el mineralogista debe estudiarla detalladamente para determinar su contenido mineralógico, el químico analista determinará los elementos presentes, el ingeniero de minas se encargará de la extracción de la mena y el metalurgista deberá procesarlo para la recuperación de minerales o elementos presentes. Cualquier alteración de esta secuencia, puede acarrear problemas y retrasos en la puesta en producción de un proyecto minero.
2. El análisis mineralógico, es una herramienta muy importante para la solución de problemas mineralógicos durante las diferentes etapas de evolución de un proyecto minero. La información referente a la textura, mineralogía y composición química de una mena, durante la etapa de exploración y desarrollo, sirve de guía al geólogo de exploraciones para la evaluación más precisa de un yacimiento mineral y al metalurgista durante las pruebas metalúrgicas previas a la selección de un proceso de beneficio adecuado.
3. En hidrometalurgia, la información proporcionada por el análisis mineralógico es crítico, debido a que la mineralogía y textura de la ganga y la mena controlan los procesos de extracción de los metales.
4. Los minerales y sus propiedades además tienen incidencia en otros dos campos: En las consideraciones económicas y en la elaboración de modelos matemáticos.
El costo de producción de minerales comerciables a partir de

las menas, puede ser considerado como una "propiedad adicional" de los minerales, debido a que es un factor determinante para descartar o llevar adelante un proyecto minero. Igualmente, una predicción matemática precisa, del comportamiento de los diferentes minerales antes de que sean molidos y separados, es obviamente de gran importancia en la utilización de los recursos minerales, debido a que puede evitar pérdidas de tiempo y dinero en pruebas innecesarias.

6. REFERENCIAS

1. AGARWAL, J. C. y otros. 1976. Process Petrography and ore Deposits: Min. Con. Jour; pp. 8-35.
2. AMSTUTZ, G. C. Microscopy Applied to Mineral Dressing: Quarterly of the Colorado school of Mines, pp. 444-481.
3. BIRD, P. H. 1935. Mounting Concentrates and Tailings for Microscopy study: E. M. Journal V. 136; pp. 223-234.
4. EAKINS, P. R. 1960. Geologist Role in Exploration: The Candian Min. and Metallurgical Bull. pp. 873-876.
5. GAUDIN, A. M. 1944. Unusual Minerals in Flotation Products at Canenea Mill studied Quantitatively by Microscope: En. Min. Jour. V. 134. pp. 523-527.
6. HEAD, R. E. 1928. Microscopy Study of an Ore as an Aid in Copper Leaching: Eng. Min. Jor V. 126. pp. 13-15.
7. KENYON, R. 1956. Geologist-Metallurgist Cooperation in Prophyry Copper Exploration: Min. Eng; pp. 703-7750.
8. LIEBENBERG, W. R. Mineralogy and the Metallurgist: Minerals SCI Enging. pp. 3-23.
9. MINO, H. 1955. Mill Control, Faster and Better: Eng. Min. Jor, vl. 156. p. 97.
10. NABICHIAN, M. 1972. Concept of Cross Podwer in the Quantitative X-Ray Difraction Analysis of Mineral in Flotation Products: Soc. Min. Eng. AIME: Vol. 252 pp. 398-402.
11. PETRUK, W. 1976. The Aplication of Quantitative Mineralogical Analysis of Ores to ore Dressing: CIM Bull; pp. 146-153.
12. STEPHENS, J. D. Microprobe Aplication in Mineral Exploration and Development Programmes; Mineral SCI, Eng: pp. 26-37.