

La mineralogía en el negocio minero metálico

Mineralogy in the metal mining business

Enrique Guadalupe Gómez *

RECIBIDO: 13/07/2015 - APROBADO:23/11/2015

RESUMEN

Los minerales son un factor unificante en todas las fases del negocio minero, ya sea en la exploración, explotación, concentración, fundición y refinación, comercialización, cierre y poscierre, e inclusive en los factores medioambientales y de seguridad y salud ocupacional.

En la exploración algunos minerales sirven como guías en la búsqueda de tipos de yacimientos, el valor económico de los concentrados se da en función de los porcentajes en mena y son diferentes en función del tipo de mineral; en la explotación, por ejemplo, la facilidad de la perforación está de acuerdo al tipo de mineral o roca; en la concentración es clave conocer el comportamiento de la mena y ganga en todo el proceso; en la comercialización, según la naturaleza del mineral, tendrá su precio y finalmente en el cierre de la mina es necesario mantener la estabilidad física y química del mineral en el tiempo.

Palabras clave: Mineralogía, negocio minero-medioambiental.

ABSTRACT

Minerals is a unifying factor in all phases of the mining business, whether in the exploration, mining, concentration, smelting and refining, marketing, closure and post-closure, and even in the environmental and occupational health and safety factors.

In exploring some minerals exploration serve as guides in the search for types of deposits, the economic value of the concentrates is a function of ore percentages and are different depending on the type of mineral; in exploiting such ease of drilling it is according to the type of mineral or rock; in the concentration is key in understanding the behavior of the ore and gangue in the whole process; in marketing according to the nature of the mineral have its price and eventually the mine closure is necessary to maintain the physical and chemical stability of the mineral over time.

Keywords: Mineralogy - Minin Business - Enviromental

* Departamento de Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos; Sección Minas de la Pontificia Universidad Católica del Perú.
E-mail: eguadalupeg@unmsm.edu.pe

I. INTRODUCCIÓN

La mineralogía, como una rama de la geología, es una de las ciencias de gran aplicación en la industria minera. El Perú como país minero debe aprovechar los minerales de manera intensiva, racional y de manera económica, optimizando su extracción y proceso en las diversas fases del negocio minero, desde la exploración hasta el cierre de mina; para ello se evalúa si el proyecto minero es rentable, para lo cual es necesario conocer profundamente el tipo de yacimiento, su mineralogía, tonelaje, ley, forma, tamaño, profundidad. La conjunción de ellos hace que el negocio sea rentable, poco rentable o sencillamente no rentable, por lo que el proyecto se queda truncado, pero no es tan sencillo, porque los metales tienen una cotización en el mercado mundial. Un proyecto desechado puede ser rentable si los precios de los metales suben, tan es así que los metales en estos últimos años, gracias a la industrialización, principalmente de China y otros países emergentes, han tenido excelentes precios y el país tiene suficientes recursos para su desarrollo.

La mineralogía para el presente artículo se toma de manera genérica, englobando a las rocas y sus respectivas alteraciones hidrotermales, ya que al final los dos últimos son conjuntos de minerales (Cornelios, 1997).

La mineralogía está presente desde la exploración, pasando por las fases de explotación, concentración, fundición y refinación, comercialización, hasta el cierre y poscierre de la mina. Incluso la seguridad minera, el medio ambiente y los aspectos económicos se deben tener en cuenta en el negocio minero; por ello es relevante conocer profundamente el comportamiento de los minerales en todas las fases del proceso minero.

II. METODOLOGÍA

La metodología empleada es no experimental, es de tipo descriptivo, porque se describen las diversas fases del negocio minero y los minerales involucrados. Es también exploratorio, porque hay poca información referente a los minerales en el negocio minero.

Las técnicas empleadas son la observación y la experiencia profesional por trabajos y visitas a diversos yacimientos del Perú, que permitieron tener una visión de conjunto de los aspectos mineralógicos en la industria minera, complementándose con la información bibliográfica respectiva.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Fases del negocio minero

De manera sucinta diremos que la minería se inicia con la **EXPLORACIÓN**, que consiste en la búsqueda y hallazgo de minerales económicos, y para ello se usan diversas técnicas directas e indirectas. Si hay suficiente cantidad y calidad de minerales, se pasa a la **EXPLORACIÓN** de dichos minerales, ya sea a cielo abierto o de manera subterránea con la maquinaria adecuada, extrayéndose mena y ganga. Luego se pasa a la fase de la **CONCENTRACIÓN**, donde se separa la mena y la ganga, se recuperará la mena que se convierte en el concentrado y la ganga en

relave, que se deposita en una relavera. Para la concentración hay dos técnicas principales: flotación y lixiviación. Luego de recuperada la mena como concentrado, se envía para la **FUNDICIÓN Y REFINACIÓN**, donde la mena se funde y se separa el metal de otros elementos, rompiendo la estructura molecular del compuesto mineral para extraer los metales como Pb, Zn, Cu, Au y otros. La refinación es hacer más puro el metal eliminando la mayor cantidad de impurezas. Después del proceso de fundición se desechan las escorias; luego viene la **COMERCIALIZACIÓN** de concentrados o barras de metal que han sido fundidas; pero especialmente en la comercialización de concentrados hacia otros países, se hacen deducciones por maquila y penalidades por elementos como As, Sb, Hg y otros, que son parte de los minerales que tenía el concentrado. Finalmente, viene la fase del **CIERRE**, incluso el **POSCIERRE** de la mina, donde quedarán los minerales expuestos al medio ambiente y es necesario conocerlos para estabilizarlos química y físicamente.

Como complemento en todas las fases, tendremos que tomar en cuenta los aspectos **AMBIENTALES**; es decir, el comportamiento del mineral dentro del proceso o expuesto al medio ambiente, por ello los minerales están íntimamente relacionados al medio ambiente. Otro punto importante a tocar es la **SEGURIDAD MINERA Y SALUD OCUPACIONAL**, porque los minerales también influyen en el bienestar del trabajador.

Por ello, la mineralogía es la disciplina aglutinante en las diversas fases de la minería; por lo tanto, hay que comprenderla desde la exploración hasta el cierre de minas, donde se deben trabajar los minerales de manera óptima en todas las fases de la minería, cuidando el medio ambiente, la salud de los trabajadores durante todas las fases de la minería, que al final el conocimiento y manejo de los minerales influye en gran medida en el aspecto de la rentabilidad económica de la empresa y, por ende, de la sociedad (Figuras 1 y 2).

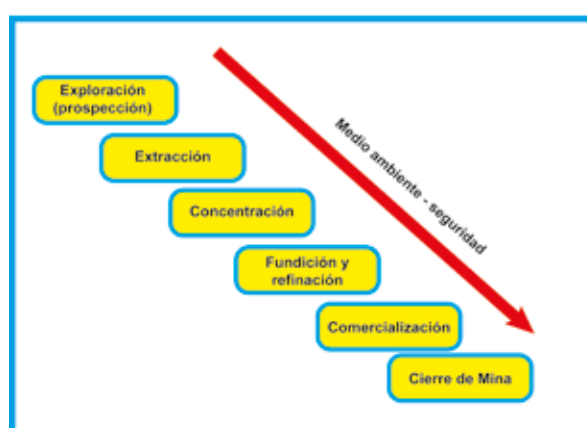


Figura N° 1. Fases del negocio minero.

La mineralogía une las diversas disciplinas que juntas logran dar rentabilidad con un mejor minado, óptima recuperación metalúrgica, la comprensión y el cuidado del medio ambiente, la seguridad y salud ocupacional (Figura N° 2).



Figura N° 2. Diversas disciplinas asociadas a la mineralogía.

3.2 Exploración

Los minerales son de suma importancia para la fase de la exploración; pueden ser guías de exploración, indicar la genética de un yacimiento, como minerales de rendimiento económico o aspectos ambientales a futuro. Como una guía de exploración tenemos, por ejemplo, minerales de alunita y/o enargita; es un indicativo de la probable existencia de un yacimiento epitermal de alta sulfuración como Yanacocha, Pierina, o la ocurrencia de cuarzo-adularia puede indicar que se trata de un epitermal de baja sulfuración, como en el yacimiento de Arcata.

Si encontramos granate, epidota y anfíboles, podría indicarnos la posible existencia de un yacimiento de skarn, como Antamina, Tintaya, Milpo.

En otros casos, las limonitas, principalmente la goethita que está como un gossan, pueden ser indicativo de la existencia de sulfuros a profundidad. Está claro que al final buscamos minerales de mena Au, Ag, Pb, Zn, Cu y otros.

La fase de exploración es clave para el negocio minero. Se debe conocer toda la mineralogía del yacimiento, ya sean menas o gangas, porque de ellas dependen las otras fases y no debemos olvidar que las leyes del mineral no es dato suficiente para la buena marcha de la mina. Es necesario conocer la mineralogía total del yacimiento, y para ello podemos utilizar diferentes técnicas como microscopía, difracción de rayos X, espectrometría, análisis de sondas de electrones, microscopía electrónica, qemscam; este último da como resultado los porcentajes de los minerales presentes en la muestra.

3.3. Valor económico

La mineralogía de las menas puede indicarnos el valor de los minerales y las leyes de los posibles concentrados. Será diferente tener concentrados con calcopirita y/o calcosita y/o bornita. En la siguiente Tabla N° 1 podremos observar estas diferencias, poniendo como ejemplo la mineralogía del Cu.

De dicha tabla se puede entender que será diferente en valor tener un concentrado con abundante calcosita que tiene 79.8% de Cu y otro concentrado de calcopirita que tiene solamente 34.6% de Cu; otro concentrado de Cu con enargita que tiene 48.3% de Cu, pero tiene 19.1 de As, el cual no podría comercializarse por el alto contenido de As (claro está que un concentrado tiene varios minerales). Del mismo modo no serán iguales los costos en perforación si se perfora en cuarcitas (dureza 7) que en caliza (dureza 3); en el primero los costos serán mayores.

Desde el punto de vista ambiental, no será igual tener una cancha de desmonte con 70% de pirita y otra con 10% de pirita. El primero generará abundante agua ácida y, por lo tanto, mayor impacto ambiental y los costos de tratamiento de agua ácida serán altos.

Otro tema interesante respecto a la mineralogía es que dentro de ellos se pueden encontrar minerales estratégicos como las tierras raras (lantano, cerio, neodimio, lutecio y otros). También sabemos que muchos minerales como la esfalerita pueden tener cadmio y la molibdenita puede contener renio, lo paradójico es que algunos elementos son castigados en la comercialización; sin embargo, en la fundición son recuperados, como el caso del cadmio. En conclusión, diremos que nuestros concentrados contienen minerales estratégicos y no nos pagan por ello, por lo que es necesario comprender bien este tema.

3.4. Explotación

La explotación debe hacerse en función de los minerales, pero planificando para la fase de concentración. En otras palabras, se deben explotar los minerales pensando en todas las fases, pero, en la mayoría de minas, aún se trabaja en función de leyes y tonelaje, y no en función de la mineralogía, que es lo esencial. Como ejemplo vamos a tocar el punto de la perforación, donde podemos observar el desgaste de la máquina, duración de la broca, facilidad o dificultad de perforación; está íntimamente ligada a la mineralogía, ya sea como mineral, rocas o alteraciones. Veamos otro ejemplo: si estamos perforando sobre rocas arcillosas de montmorillonita, con el agua de la perforación puede hincharse el orificio perforado y dificulta el cargado de los taladros o sencillamente no se pueden cargar los taladros, especialmente con cartuchos de dinamita. Igualmente si la labor tiene mucho cuarzo y turmalina (brechas de turmalina), la perforación será dificultosa, demorará más horas hombre y habrá un mayor desgaste de las brocas y máquina; en la voladura, por tratarse de minerales duros, se necesitará más potencia en los explosivos. En conclusión, cada tipo de roca o alteración de acuerdo a su mineralogía tendrá repercusiones en la

Tabla N° 1. Mineralogía de algunas menas de cobre

NOMBRE DEL MINERAL	COMPOSICIÓN QUÍMICA	Cu %	OTROS ELEMENTOS %
Calcosita	Cu ₂ S	79.8	S = 20.2
Calcopirita	CuFeS ₂	34.6	Fe = 30.4, S = 35.0
Bornita	Cu ₃ FeS ₄	63.3	Fe = 11.2, S = 25.5
Enargita	Cu ₃ AsFeS ₄	48.3	As = 19.1, S = 32.6
Malaquita	Cu ₂ CO ₃ (OH) ₂	57.4	CuO = 71.9, CO ₂ = 19.9, H ₂ O = 8.2
Crisocola	CuSiO ₃ nH ₂ O	40.4	CuO = 32.4 - 42.2, SiO ₂ = 37.9 - 42.5, H ₂ O = 12.2 - 18.8
Tetraedrita	Cu ₁₂ S ₄ S ₁₃	45.77	Sb = 29.2, S = 25.0

Fuente: Tomado de Cornelis.

explotación por ello. Uno de los factores para el diseño del minado es la geomecánica y esta se basa en el macizo rocoso compuesto de minerales.

Otro tema en minería subterránea es el sostenimiento de labores de mina, será más caro y dificultoso en zonas argillizadas que en zonas silisificadas; en la primera se necesita sostenimiento y la labor está propensa a caída de rocas que pueden causar accidentes o muerte de los trabajadores y en el segundo caso la silisificación de manera natural ayuda a un buen sostenimiento en la mina.

3.5 Concentración

Para la concentración es necesario deslindar los dos conceptos: la ley de cabeza, que es un resultado de análisis químico, cuyo resultado da el contenido metálico. En la planta no se trata metales sino minerales, por lo que al metalurgista le interesa los minerales para tratarlos con los reactivos específicos. Esto aún en la mayoría de minas no se trabaja con mineralogía sino con leyes, salvo algunas excepciones como la mina Cerro Verde y otras. Otro problema álgido en la concentración, así como en la explotación, es cuando se tiene minerales primarios como calcopirita junto a minerales secundarios, especialmente de la zona de enriquecimiento por oxidación, como malaquita, crisocola, cuprita; entonces, el dilema es si se envía a la planta de flotación o a la planta de lixiviación. El aspecto de la mineralogía en porcentajes es clave para tomar las decisiones, la ley no sirve para resolver este dilema. Realmente en la concentración de minerales todo el proceso metalúrgico es en función de los minerales. En la molienda si se tiene mucho cuarzo, turmalina y otros minerales de alta dureza, la molienda será difícil y cara con gran desgaste de bolas o barras, camiseta de los equipos de molienda; de igual modo, si hay muchas arcillas se pegarán dificultando la molienda y repercutirán en la flotación y lixiviación, por ello es recomendable hacer el análisis mineralógico en todo el proceso, es decir, desde el chancado hasta la obtención del relave o concentrado.

En muchos casos es más importante conocer la naturaleza de la ganga que entra en mayor cantidad a las plantas pues allí pueden estar los minerales que dificultan la concentración, como diversas arcillas, cloritas y otros y en la lixiviación los carbonatos pueden consumir mucho ácido y generar costos adicionales (Canchaya, 2012).

3.6 Fundición y refinación

Como los concentrados están compuestos por minerales molidos, de acuerdo a ellos tendremos la obtención de diversos metales.

Pongamos un ejemplo: Si en los concentrados tendríamos tetraedrita, platas rojas, entonces tendríamos mayores contaminantes de As y Sb, tanto dentro del proceso como en las escorias.

En la fundición de los sulfuros se produce abundante dióxido de azufre. Si se suelta al aire es un gran contaminante, pero sería más económico para el negocio minero que este gas se pueda convertir en ácido sulfúrico para usarlo en la lixiviación pirometalúrgica.

En la fundición de la marmatita (sulfuro de Zn y Fe) se necesitará mayor temperatura y se tiene que separar

el Fe como escoria; en cambio, en una blenda rubia con mínimo Fe, la fundición será más sencilla.

3.7 Comercialización

Para la comercialización es importante la ley de los concentrados, también es importante saber de qué minerales está compuesto el concentrado y qué minerales serán castigados en el precio del producto final.

Así, por ejemplo, sabemos que nuestras galenas tienen plata, por eso nuestros concentrados de plomo tienen decenas de onzas de plata y se paga por ello; pero si el concentrado tuviera plata como mineral de platas rojas y fuese abundante, es posible que tuviéramos un castigo en la venta de nuestros concentrados por el contenido de arsénico y antimonio. Por eso, el blending tiene que hacerse en la mina a base de los minerales. Será diferente el precio de un concentrado de blenda rubia que una marmatita con Fe.

3.8 Cierre y poscierre

En el cierre de mina es necesario entender la mineralogía de los relaves, de las canchas de desmonte y todos los procesos donde se involucran los minerales; razón por la que debemos ver la mineralogía no en el presente, sino en el futuro. Por ejemplo, el agua ácida generada por las piritas puede durar cientos de años y no existirá ninguna empresa minera que pueda tratar el drenaje ácido por cientos de años.

La estabilidad química que indica el reglamento está íntimamente relacionada a la mineralogía; por eso, es de importancia conocer el comportamiento de los minerales a través del tiempo, para tomar medidas en el cierre de minas. No debemos olvidar que muchos minerales reaccionan lentamente, por ello es necesario estabilizarlos, especialmente desde el punto de vista químico.

En la minería deben usarse tecnologías limpias, que implica la reducción de los desechos no biodegradables o minimización de impactos ambientales y la autosostenibilidad ambiental; si bien aumentarán los costos, a largo plazo es más económico al negocio minero.

IV. CONCLUSIONES

Los minerales, rocas y alteraciones son los que participan en las diversas fases del negocio minero y es necesario conocer su naturaleza y comportamiento a lo largo de todo el proceso, desde la exploración hasta el cierre de la mina, lo cual permitirá tener la mayor rentabilidad en el negocio minero.

V. AGRADECIMIENTOS

Al instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos por el apoyo a la presente investigación.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Cornelis Klein, Cornelius S. (1997). *Manual de mineralogía*. Barcelona: Reverte.
2. Canchaya Moya Samuel (2012). *Mineralogía*. Diplomatura de Geometalurgia PUCP.