



# El yacimiento es una ventaja comparativa

En cambio, la gestión y la tecnología son ventajas competitivas.

## VENTAJAS QUE CREAN VALOR AGREGADO

Los yacimientos de cobre de Zambia son maravillosamente ricos naturalmente, lo que constituye una ventaja comparativa del país. Pero la nacionalización realizada en los 70 fue mal gestionada durante tres décadas. Recién hace poco, en manos privadas, está repuntando la producción y rentabilidad de sus minas de cobre.

Por el contrario, la nacionalización del cobre en Chile en 1970 el Centro de Investigación Minero Metalúrgico, CIMM, el que se transformó en una escuela extraordinaria de tecnología y de especialización de miles de ingenieros y profesionales. Y también, Chile contó con trabajadores capacitados.

Chile se había preparado para manejar las minas durante décadas, y había creado en los años 70 el Centro de Investigación Minero Metalúrgico, CIMM, el que se transformó en una escuela extraordinaria de tecnología y de especialización de miles de ingenieros y profesionales. Y también, Chile contó con trabajadores capacitados.

Los resultados están a la vista. Desde su creación, Codelco le aportó a Chile más de US\$112.000 millones para su presupuesto fiscal, aumentó su producción casi tres veces y es la empresa más querida y respetada por los chilenos.

Por bueno que sea un yacimiento, sin una buena gestión no hay rentas.

### PROCESOS NO EXPORTABLES

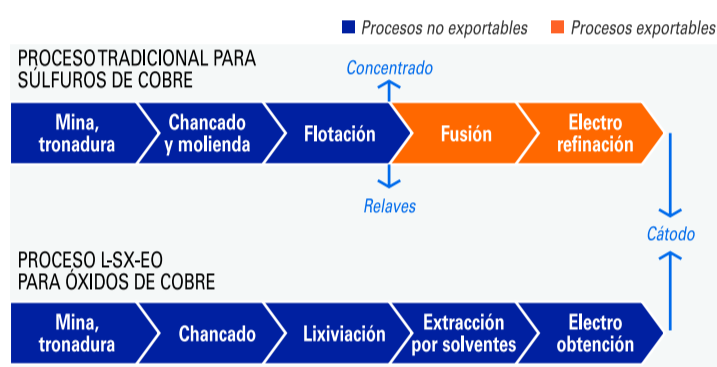
El mayor valor en minería se genera en aquellos procesos que no pueden ser exportados (Figura 1). ¿Cuáles son estos?

Desde luego, las minas no pueden trasladarse, y las plantas concentradoras y pilas de lixiviación no pueden estar lejos de los yacimientos, y si lo están, el mineral debe ser trasladado por gravedad hacia estas, como en el caso de la mina Los Bronces.

En Chile, cerca de dos tercios del cobre producido se recupera en plantas concentradoras, las que producen concentrados de cobre, mientras que el resto se procesa mediante lixiviación (Lix), extracción por solventes (SX) y electroobtención (EO), cuyo producto final es un cátodo de cobre de 99,999% de pureza.

Las plantas concentradoras procesan la roca mineralizada que les envía la mina, pero más del 99% de esta es desecho, por lo que sería impensado que Chile exportara roca a Chi-

### PROCESOS EXPORTABLES Y NO EXPORTABLES EN LA MINERÍA DEL COBRE



### LEY DE CORTE

La ley de corte corresponde a la menor concentración del elemento principal, en este caso el cobre, extraída y enviada a la planta en un momento determinado. Kenneth Lane desarrolló un algoritmo para determinar la ley de corte óptima, desde el punto de vista del valor extraído. La roca mineralizada cuya concentración del metal principal es inferior a la ley de corte se denomina estéril, y es enviada a botaderos, los que pueden estar segregados en baja o mediana ley. Estos últimos podrían ser explotados en el futuro si se desarrollan tecnologías adecuadas o bien si el precio sube hasta hacer rentable su explotación.

El monitoreo de la ley de corte y la apropiada separación de la roca mineralizada que va a la planta o a botaderos es clave, ya que si se envía material con ley mayor que la ley de corte al botadero, o bien con ley menor que la ley de corte a la planta, la recuperación global del yacimiento cae.

na y que las plantas concentradoras estuviesen ubicadas ahí.

Cerca del 90% de la renta o valor agregado en estas minas se genera en el proceso hasta producir concentrados. Las fundiciones y refinadoras pueden estar ubicadas en cualquier parte del mundo y generan una pequeña renta, incluso las instalaciones más avanzadas y competitivas.

Por ello es impensado que China y otros países que usan el cobre puedan extraer mayor valor agregado del cobre chileno. El valor agregado del cobre se queda en Chile de todas formas, al menos con la tecnología actual.

### UN YACIMIENTO DE COBRE

Un yacimiento de cobre es un cuerpo de roca con minerales de cobre que contiene una concentración de este metal estadísticamente superior a la del resto de la corteza terrestre. El promedio de la concentración de cobre en esta es de 68 partes por millón o 0,0068%.

En 2013 la concentración de cobre promedio en la roca extraída para producción en Codelco fue aproximadamente 0,73%, es decir unas 110 veces más que la concentración de

cobre promedio en el jardín de una casa.

El conocimiento acertado de la concentración promedio depende del número de sondeos realizados, de su distribución, y de la experiencia de los geólogos e ingenieros de minas para estimar dicha concentración. La concentración de cobre en un yacimiento varía en forma distinta en diferentes direcciones. Esta propiedad se llama anisotropía.

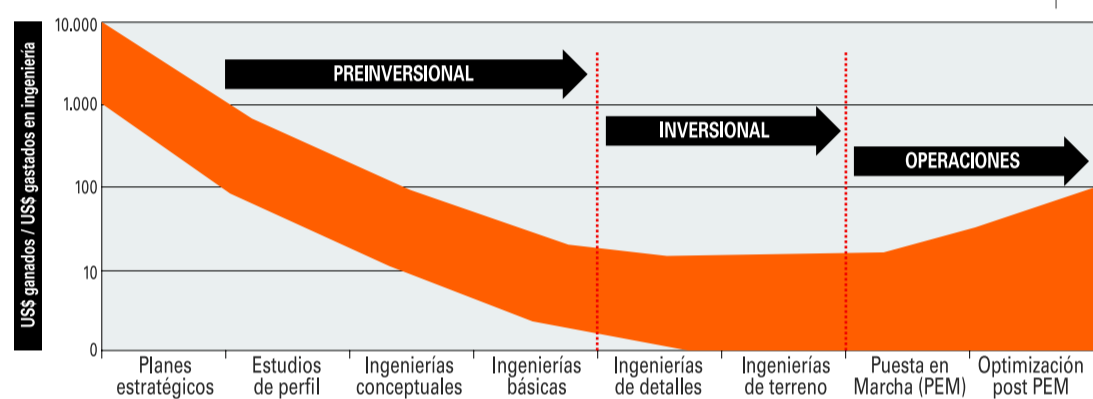
Las impurezas nocivas, como el arsénico, también deben

### La renta está en los procesos que no se pueden exportar.

ser conocidas para el diseño de la planta concentradora, que es donde se separa el cobre de los otros metales y elementos en el proceso tradicional. Por último, la roca mineralizada extraída para procesamiento puede contener elementos que reducen la recuperación, por lo que es necesario tener una completa caracterización química y geológica de los yacimientos.

Finalmente, es común que

### 1 VALOR AGREGADO DE LA INGENIERÍA EN EL CICLO DE VIDA DE UN YACIMIENTO



Fuente: JRI Ingeniería.

mente en la siguiente —la ingeniería conceptual—, se propagará posteriormente en la rentabilidad del yacimiento durante su vida útil (Figura 2).

Los puntos de muestreo de los sondeos se establecen con metodologías que permiten realizar un modelo matemático representativo de la composición química y física del yacimiento.

Una etapa clave en la elaboración del modelo es la aplicación de la teoría denominada Kriging, desarrollada por el matemático francés Georges Matheron. El método consiste en la interpolación y extrapolación de valores medidos mediante la asignación de peso-distancia a los nuevos puntos estimados.

### MODELO DE BLOQUES

La siguiente etapa consiste en segmentar el yacimiento en pequeños bloques, los que pasan a constituir el modelo de bloques. Cada uno de estos debe estar plenamente caracterizado. Debe conocerse la dureza de la roca, y la concentración de cobre, de metales subproductos, de impurezas y de los elementos que interfieren con la recuperación.

La determinación del tamaño de cada bloque se logra mediante métodos geoestadísticos matemáticamente sofisticados, con objeto de aumentar la exactitud y la precisión de estimación de la composición real de un yacimiento. Un tamaño de bloque puede ser, por ejemplo, de 25x25x15 m.

El modelo de bloques, los costos, el precio de los metales valiosos y otras variables del proyecto son introducidas a un software de planificación minera, que establece un

“Plan Minero” de explotación del yacimiento que maximiza el valor presente neto (VPN) del metal extraído en el tiempo, a través de la vida del yacimiento, por ejemplo 15, 20 o 30 años.

Para llegar al plan minero definitivo hay que decidir cuánto del yacimiento es económico explotar, establecer el rajo final (en el caso de una mina a cielo abierto), las envolventes sucesivas del rajo, la pendiente de los taludes, las rampas de acceso y las diversas etapas de explotación. Al final, se estima el VPN del proyecto, aspecto clave para que los inversionistas tomen la decisión de seguir adelante o abandonar.

### UN EJEMPLO DE BUENA GESTIÓN

El yacimiento Radomiro Tomic comenzó a producir en 1998 y tuvo un diseño óptimo que aprovechó la experiencia de su vecino, El Abra, construido dos años antes.

Además, su modelo de gestión se diferenció del resto de las divisiones de Codelco básicamente porque sus trabajadores tenían sueldos de mercado, eran polifuncionales y altamente productivos.

Radomiro Tomic recuperó la inversión en cuatro años de bajo precio del cobre, y tuvo los costos más bajos de Codelco durante años. Su modelo de gestión es utilizado por las dos nuevas minas de la corporación, Gabriela Mistral y Ministro Hales.

¡Hasta el próximo sábado!

El profesor ayudante de este curso es David Peters, ingeniero de proyectos Departamento de Ingeniería de Minería UC.