

**Comisión Chilena del Cobre**  
Dirección de Evaluación de Gestión Estratégica

**Reseña de la Innovación Tecnológica  
en la Minería del Cobre: “El Caso Codelco”.**

**DG/12/05**

Registro de Propiedad Intelectual  
© N° 152.180

## Índice

<b>Resumen Ejecutivo.....</b>	<b>1</b>
<b>1. Introducción.....</b>	<b>3</b>
<b>2. Retrospectiva del Desarrollo Tecnológico en la Minería: Quiebres Tecnológicos. ....</b>	<b>4</b>
2.1. Explotación Subterránea por Block Caving.....	4
2.2. Explotación a Rajo Abierto.....	5
2.3. Flotación de Minerales Sulfurados.....	5
2.4. Electroobtención-Extracción por Solventes .....	6
<b>3. Innovación e Investigación Tecnológica: El Caso Codelco.....</b>	<b>7</b>
3.1. Evolución de la Innovación Tecnológica en Codelco.....	7
3.2. Escenario Actual.....	8
3.3. Desafíos Futuros: Quiebres Tecnológicos Emergentes.....	9
3.3.1. Innovación Tecnológica en Minería Subterránea.....	10
3.3.2. Innovación Tecnológica en Bio-Hidrometalurgia.....	12
<b>4. Gastos en Investigación e Innovación Tecnológica de las Principales Empresas Productoras de Cobre en el Mundo.....</b>	<b>14</b>
<b>5. Comentarios Finales.....</b>	<b>16</b>
<b>Bibliografía .....</b>	<b>17</b>

## **Resumen Ejecutivo.**

El presente informe tiene como objetivo describir la evolución histórica de la innovación tecnológica en Codelco y los resultados obtenidos de los principales estudios tecnológicos realizados en la actualidad por la Corporación, considerando sólo aquellas de alto impacto en el negocio (“quiebres tecnológicos”)<sup>1</sup>, como son la biolixiviación y la minería subterránea de alta productividad. Adicionalmente, se señalan los hitos de las principales innovaciones tecnológicas de la industria minera adaptadas en el presente en la minería del cobre. Finalmente, se indican los gastos asignados a investigación e innovación tecnológica por las principales empresas productoras de cobre del mundo.

A lo largo de la historia, la industria minera ha debido enfrentar diversas dificultades operativas, como disminución de las leyes, aumento de la dureza de la roca, condiciones mineralógicas adversas, lo que ha incidido en el aumento paulatino de los costos de operación. De este modo, se han impulsado distintas iniciativas para reducir dichos costos, una de éstas es la investigación e innovación tecnológica.

Entre las principales innovaciones tecnológicas experimentadas por la industria minera destacan los denominados “quiebres tecnológicos”, como el block caving, rajo abierto, flotación, extracción por solventes y electroobtención. Cabe consignar que estos no fueron creados por la minería del cobre, sino han sido adaptados de otras industrias mineras (zinc, uranio, hierro).

Particularmente para Codelco, desde la década de los 90, las dificultades operacionales de sus yacimientos se han incrementado, situación que podría poner en riesgo no solamente su competitividad sino que su liderazgo dentro de la industria del cobre. En consecuencia, la Corporación ha situado la innovación tecnológica como un pilar fundamental de su estrategia de negocio.

Adicionalmente, los Planes de Negocio y Desarrollo de la Corporación establecen que el tonelaje de mineral proveniente de las minas subterráneas aumentará en forma progresiva, desde los actuales niveles, situados en torno a las 200.000 toneladas por día de mineral hasta llegar a cifras potenciales de 350.000 toneladas por día de mineral hacia el año 2020. Asimismo, por efecto de la disminución de las leyes de cobre y profundización de los sectores productivos, se proyectan, sin considerar la plataforma de innovaciones tecnológicas, aumentos paulatinos en los costos de operación. Por otro lado, señalan que existe un potencial enorme de mineral sulfurado de baja ley de cobre, que podría ser tratado a través de biolixiviación.

---

<sup>1</sup> Definidas como innovaciones radicales que producen gran impacto en el negocio, principalmente desde el punto de vista de la reducción de costos de operación.

Lo anterior genera un doble desafío para Codelco, por una parte, crecer a prácticamente al doble de su producción actual en minería subterránea, y por otra, lidiar con los desafíos de la naturaleza de sus operaciones. De este modo nacen los denominados “Programas Tecnológicos Corporativos”, entre los que destacan actualmente, los relacionados a la explotación subterránea y a la biolixiviación. Cabe señalar que entre los años 2000 y 2004, las inversiones asignadas a estos programas tecnológicos ascendieron a US\$ 88 millones, cifra que ubica a Codelco en un lugar destacado dentro de las empresas mineras.

Si los resultados de los programas tecnológicos son positivos, la Corporación podría crear valor a través de dos formas, incorporando dichos programas a sus operaciones actuales y posibilitando nuevas oportunidades de negocio al aplicar estas innovaciones en otras faenas alrededor del mundo.

## 1. Introducción.

Codelco, al igual que otras empresas mineras, depende de las fuertes fluctuaciones del precio del cobre (commodity), por lo cual los costos de operación constituyen una variable determinante para mantener su competitividad en el largo plazo.

En este sentido, el aumento paulatino de los costos de operación por efecto del aumento de la profundidad de explotación en las faenas mineras y las consecuentes dificultades operacionales propias de los yacimientos (disminución de las leyes, aumento de la dureza de la roca, condiciones mineralógicas adversas), ha llevado a la industria minera del cobre a emprender diversas innovaciones tecnológicas.

La literatura señala dos tipos de innovaciones tecnológicas, una de ellas es la innovación incremental, definida como el mejoramiento sucesivo de los productos y procesos de la cadena del valor, y la otra es la innovación radical (quiebre tecnológico), la que incursiona en tecnologías de alto impacto. Ejemplos de esta última son el rajo Abierto, block caving, flotación, electroobtención, extracción por solventes, entre otras.

Bajo este enfoque, el presente artículo tiene como propósito describir los avances de las principales innovaciones tecnológicas emprendidas por Codelco, a fin de contextualizar estas tecnologías con los grandes quiebres tecnológicos de la industria minera. Para ello, se ha sintetizado la información disponible en cuatro tópicos:

- Retrospectiva a los principales quiebres tecnológicos de la minería mundial, y su relación con la minería del cobre.
- Evolución de la innovación e investigación tecnológica en Codelco.
- Situación actual y desafíos futuros de los quiebres tecnológicos de Codelco.
- Gastos en innovación e investigación tecnológica de las principales empresas mineras del cobre.

## **2. Retrospectiva del Desarrollo Tecnológico en la Minería: Quiebres Tecnológicos.**

La industria minera ha enfrentado diversos factores que la han obligado a innovar para mantener su competitividad. En particular, uno de los factores principales está relacionado con las características de los yacimientos (en la medida que estos yacimientos son explotados, se reducen paulatinamente las leyes de los metales, en consecuencia aumentan los costos de operación, puesto que para obtener una producción determinada del metal se necesita extraer mayores volúmenes de mineral o de roca). Una de las formas de enfrentar este problema es la implementación de innovaciones tecnológicas que conlleven una importante reducción de los costos de operación.

Particularmente, la minería del cobre no se caracteriza por ser una industria generadora de nuevas tecnologías, sino más bien ha sido una industria que a lo largo de su historia se ha destacado por ser adaptadora o receptora de innovaciones tecnológicas de otras industrias mineras.

De este modo, durante el siglo XIX, la base tecnológica de la minería del cobre fue adaptada principalmente de la industria del hierro y carbón. En este siglo se crearon grandes tecnologías, entre las que se destacan: perforadora rotatoria manual (1885), chancador de rodillos (1832), chancador de mandíbulas (1886) y chancador giratorio (1883).

Durante el siglo XX, el principal motivo que impulsó la adaptación y desarrollo de tecnologías en la minería del cobre, fue la drástica disminución de las leyes de los yacimientos. En principio estos tenían leyes por sobre el 4%, llegando a valores de 2%, e incluso en algunos casos bajaron a menos de 1%.

Como consecuencia de lo anterior, emergió la adaptación y desarrollo de al menos cinco quiebres tecnológicos importantes: Block Caving, Rajo Abierto, Flotación de minerales sulfurados, Electroobtención y Extracción por Solventes.

### **2.1. Explotación Subterránea por Block Caving.**

Según E.T. Brown<sup>2</sup>, a fines del siglo XIX, el método de explotación de *Block Caving* fue desarrollado en las minas de hierro de Menominee Ranges.

A comienzos de siglo XX, se aplicó este método de explotación en las minas de cobre ubicadas en el Oeste de Estados Unidos.

Durante el año 1940, la mina El Teniente introduce este método a sus operaciones. Sin embargo, en el año 1982, se implementó en este yacimiento

---

<sup>2</sup> "Block Caving Geomechanics", The International Caving Study Stage I (1997-2000), 2003.

una variante evolucionada, denominada *Panel Caving*, a consecuencia del aumento de la dureza de la roca del yacimiento, por efecto de su profundización. Posteriormente, esta variante sufre modificaciones a fin de controlar los fenómenos de “estallidos de rocas”, surgiendo con esto el Panel Caving con hundimiento previo y hundimiento avanzado.

## **2.2. Explotación a Rajo Abierto.**

De acuerdo a lo señalado por John Marsden<sup>3</sup>, el método de explotación de *rajo abierto*, representó una importante plataforma para el desarrollo de tecnologías basadas en economías de escala. Como consecuencia de su aplicación, las principales minas productoras de cobre aumentaron fuertemente su explotación de mineral. Un ejemplo de lo anterior es Utah Copper, que aumentó desde los 15.000 a 75.000 toneladas por día de mineral (tpd) entre los años 1910 y 1940. Por su parte, la mina Chuquicamata, en el año 1927 ya explotaba a razón de 20.000 tpd y en 1950 alrededor de 50.000 tpd.

## **2.3. Flotación de Minerales Sulfurados.**

No sólo la explotación a rajo abierto y explotación subterránea por Block Caving constituyeron la base del significativo aumento de producción de cobre, sino también la invención de la *flotación*. Ésta reemplazó al método de concentración gravitacional.

John Marsden señala además que, dicha tecnología, fue otro de los quiebres tecnológicos de esa época, puesto que permitió aumentar la recuperación de metales desde 64%, la cual se obtenía mediante concentración gravitacional, a cifras en torno al 90%.

La flotación fue patentada por Francis Elmore en el año 1898. No obstante, sólo recién en 1905 se aplicó a escala industrial, reconociendo a Central Mill de Broken Hill en Australia como la primera faena productiva en aplicar comercialmente el proceso de flotación para el proceso de recuperación de zinc, tal como se conoce en la actualidad.

En la década de los 30, más del 50% de la producción de cobre de Estados Unidos se generaba mediante el proceso de flotación. Asimismo, más del 65% de la producción mundial de cobre (dominada por Estados Unidos y Chile) provenía de este tipo de plantas.

---

<sup>3</sup> “Technology Development and Competitive Advantage: Sustainable or Short Term”, Pittsburgh Engineer, 2004.

## 2.4. Electroobtención-Extracción por Solventes .

En relación al proceso de *electroobtención* (EW) de minerales oxidados de cobre, según lo descrito por Nathaniel Arbiter y Archie W. Fletcher<sup>4</sup>, los primeros en aplicar esta tecnología en el cobre, fueron Ajo, Arizona y Chuquicamata (1915).

Por otro lado, la tecnología de *extracción por solventes* (SX) fue creada por la industria del uranio, durante la segunda guerra mundial. Posteriormente fue adaptada para el tratamiento de una variedad de metales, entre ellos el cobre. En la minería del cobre, la primera faena que utilizó la tecnología de extracción por solventes fue Bluebird (1968) y recién en el año 1987, fue implementada en la mina Chuquicamata.

El auge de la aplicación de ambas tecnologías se produce alrededor del año 1980. En este año la aplicación SX-EW representaba alrededor del 3% de la producción mundial de cobre, aumentando a 8% en el año 1987. Mientras que en los años 1994 y 2000 la producción representó cerca del 18% de la producción mundial.<sup>5</sup>

---

<sup>4</sup> "Copper Hydrometallurgy- Evolution and Milestone", Mining Engineering, febrero 2004.

<sup>5</sup> Marsden, John. "Technology Development and Competitive Advantage: Sustainable or Short Term", Pittsburgh Engineer, 2004.



### 3. Innovación e Investigación Tecnológica: El Caso Codelco.

#### 3.1. Evolución de la Innovación Tecnológica en Codelco.

Uno de los primeros antecedentes de innovación e investigación tecnológica de la Corporación, fue el desarrollo, en el año 1977, del *Convertidor Teniente*, el cual entrega un producto intermedio llamado Metal Blanco<sup>6</sup>. Esta iniciativa nació en respuesta a la necesidad de mayor capacidad de fusión en la fundición de Caletones en El Teniente. Actualmente esta tecnología ha sido aplicada con gran éxito en varias fundiciones del mundo.

Por otra parte, a partir de la década pasada, las dificultades operacionales propias de la magnitud de las operaciones mineras y de la naturaleza de los yacimientos (disminución de las leyes, aumento de la dureza de la roca, condiciones mineralógicas adversas) se fueron incrementando. Esta situación se ha acentuado en el presente, poniendo en riesgo la competitividad y liderazgo de Codelco en la industria minera del cobre, debido a que han sido las principales causas del aumento paulatino de costo de operación e inversión.

Hasta el año 1991, la innovación tecnológica se basó en un esquema de “innovación reactiva”, que consistía en dar solución a los problemas suscitados en la operación minera.

Entre los años 1991 y 1994, se inició la etapa de fomento de la innovación, caracterizada por la inclusión del mejoramiento continuo en la operación. Asimismo, en el año 1995 se decide entrar en el ámbito de la institucionalidad tecnológica.

Con la puesta en escena de la institucionalidad tecnológica, Codelco comprende que la innovación es uno de los pilares estratégicos para consolidar su posición de liderazgo y mantener su competitividad. Es así que en el año 1996 la Corporación promulga la “Política de Investigación e Innovación Tecnológica de Codelco-Chile”, y a principios de esta década, incorpora la innovación tecnológica dentro de sus “impulsos estratégicos”.

Los ejes de la Política de Investigación e Innovación Tecnológica (I&IT) se sintetizan en los siguientes puntos:

- Posicionamiento en el primer nivel de uso de la tecnología disponible en el mercado.
- I&IT en forma sistemática y permanente en áreas donde el mercado no ofrece una respuesta integral.

---

<sup>6</sup> Este contiene entre 70 y 75% de cobre. El cobre contenido en el metal blanco se encuentra en forma de sulfuro de cobre (CuS), lo que le da el aspecto blanquecino.

- Perfeccionamiento de la organización de I&IT.
- Desarrollo y especialización técnica de profesionales.
- Perfeccionamiento de la gestión de I&IT.
- Acuerdos de cooperación.
- Protección del patrimonio tecnológico.

Como resultado de la implementación de esta política, se generaron distintas iniciativas de innovación, entre la que destaca, en el año 1998, la creación del Instituto de Innovación de Minería y Metalurgia (IM2)<sup>7</sup>, con el objeto de abordar integralmente los crecientes desafíos tecnológicos de la Corporación.

Las actividades de I&IT se centraron en programas capaces de generar cambios significativos en los procesos operativos, a los cuales se les denominó “quiebres tecnológicos”. El esquema de trabajo de dichos programas se basó en la integración horizontal de las Divisiones de la Corporación<sup>8</sup>.

Los montos involucrados en estos programas, entre el año 2001 y el 2004, se han incrementado en aproximadamente un 28%.

En síntesis, la evolución de la innovación tecnológica ha transitado desde el mejoramiento continuo, pasando por la adaptación de tecnologías, hasta llegar en la actualidad a estudios de innovaciones tecnológicas proactivas, cuyo objetivo es generar cambios de fuerte impacto.

### **3.2. Escenario Actual.**

En el pasado, una de las ventajas de Codelco fue que gran parte de sus operaciones mineras subterráneas –Divisiones Andina, El Teniente y El Salvador– estuvieron ligadas a zonas de explotación en rocas caracterizadas por menor rigidez, baja dureza y alto fracturamiento natural. Esto permitía que Codelco fuese altamente competitivo.

En el presente, la competitividad de la empresa se ve amenazada, puesto que los planes de largo plazo de la Corporación, sin considerar la plataforma de innovaciones tecnológicas, proyectan aumentos paulatinos en los costos de operación, por efecto de la profundización de los sectores productivos. A medida que los yacimientos se profundizan aumenta la proporción de roca de mayor competencia natural, más dura y de alta resistencia. Este escenario, poco favorable para las operaciones subterráneas actuales, se refleja en la dificultad para hundir y fragmentar la roca, teniendo como consecuencia mayores inversiones en infraestructura minera y aumento de los costos de operación.

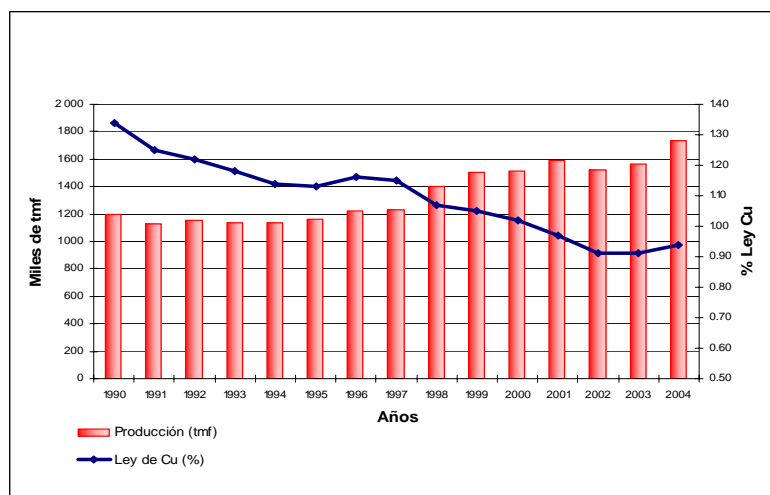
---

<sup>7</sup> Filial de Codelco, cuya propiedad es 99% de la Corporación y 1% del CIMM (Centro de Investigación Minera y Metalúrgica).

<sup>8</sup> Las actividades de los programas corporativos se han focalizado en: minería subterránea, procesamiento de minerales, procesos pirometalúrgicos e hidrometalurgia.

En este sentido, en la última década ha disminuido fuertemente la ley media de cobre de los yacimientos de Codelco. De acuerdo a lo ilustrado en el Gráfico 1, la disminución de la ley media de cobre entre los años 1990 y 2004 ha sido aproximadamente de 32%.

**Gráfico 1**  
**Producción de Cobre – Ley del Mineral, período 1990-2004.**



Fuente: COCHILCO, Sistema de Control de Gestión de las Empresas Mineras del Estado, noviembre 2005.

Por otro lado, ha aumentando significativamente el nivel de impurezas asociados a los minerales (p.e., arsénico), ha disminuido la cantidad de reservas de minerales oxidados<sup>9</sup> y las normas ambientales están siendo cada vez más restrictivas.

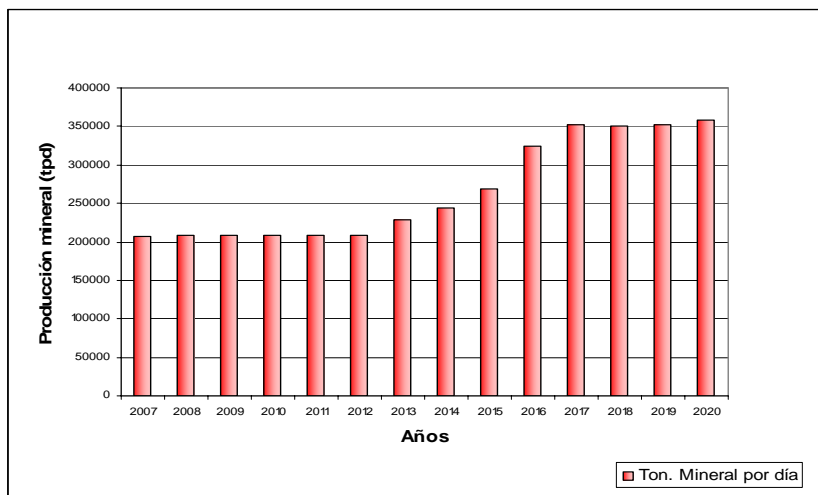
Todo esto ha forzado a estudiar e implementar tecnologías que permitan generar quiebres tecnológicos. De este modo, Codelco ha puesto su principal interés en iniciativas relacionadas con la explotación subterránea y la bio-hidrometalurgia.

### 3.3. Desafíos Futuros: Quiebres Tecnológicos Emergentes.

En relación al futuro de la minería subterránea, su producción aumentará en forma sostenida y progresiva, desde los actuales niveles, situados en torno a las 200.000 toneladas por día de mineral hasta llegar a cifras potenciales de 350.000 toneladas por día de mineral hacia el año 2020, tal como se indica en el Gráfico 2. En este mismo período, la producción de cobre proveniente de la minería subterránea se incrementará desde el 40% al 60%, con el consecuente aumento de los costos de operación.

<sup>9</sup> El procesamiento o tratamiento de este tipo de mineral involucra menor inversión y menor costos de operación.

**Gráfico 2**  
**Producción de Minería Subterránea (tmf), período 2007-2020.**



Fuente: COCHILCO, en base a información de los Planes de Negocios y Desarrollo 2005 de Codelco (PND), julio 2005.

Por ello, los futuros proyectos de minería subterránea deberán implementar tecnologías validadas en un mediano plazo, ya sea adaptando aquellas disponibles actualmente en el mercado o desarrollando tecnologías propias, cuando éstas no estén disponibles. El desafío no tiene precedentes dentro de la industria, tanto por su complejidad como por las magnitudes de mineral asociado.

Dado que el mercado mundial minero no ofrecía una respuesta integral a los desafíos tecnológicos de las minas subterráneas de Codelco, la compañía ha generado modelos de asociatividad (networking) alrededor del mundo, con empresas (DBT, Sandvik, MMD, Orica, etc), consorcios (MMT) y grupos de investigación gubernamentales (CSIRO, BRGM, universidades australianas).

Por otra parte, para enfrentar los desafíos que le impone la bio-hidrometalurgia, la Corporación se ha asociado a empresas como BHPBilliton y Nippon Mining & Metals, donde cada uno de los socios aporta conocimiento tecnológico para crear soluciones integradas de alto impacto en el negocio.

### **3.3.1. Innovación Tecnológica en Minería Subterránea.**

Entre los años 1998 y 2003, se formuló el “Programa Tecnológico Corporativo de Minería Subterránea”, cuyo objetivo era *“desafiar las prácticas operacionales vigentes y explorar alternativas de innovación tecnológica en las minas subterráneas de Codelco, para aumentar en forma significativa su competitividad”*. Los estudios han permitido

incorporar nuevos conocimientos a la minería subterránea por hundimiento, donde algunos de ellos han sido incorporados a las operaciones actuales o en la formulación de nuevos proyectos.

Los principales estudios desarrollados por este programa son: optimización del diseño minero, conocimiento de los modelos ligados al proceso de hundimiento de bloques, automatización de equipos de extracción y transporte de mineral, desarrollo de equipos para la reducción secundaria y estudios para la explotación continua de minería subterránea. En este último punto, los estudios más relevantes se aplicaron al acondicionamiento del macizo rocoso y la implementación de chancadores de reducidas dimensiones.

En el año 2004, en virtud del conocimiento generado por el “Programa Tecnológico de Minería Subterránea”, se creó el “Proyecto Corporativo de Minería Subterránea”, el cual contempla una duración de 4 años (2004-2007). Durante este período, se pretende validar y vincular al diseño minero las nuevas tecnologías emergidas del Programa Tecnológico.

El concepto del proyecto corporativo de minería subterránea se sustenta en la aplicación del preacondicionamiento, el cual se orienta a generar un conjunto de nuevas fracturas en el macizo rocoso antes de comenzar cualquier actividad de operación minera, es decir antes de llevar a cabo los procesos de socavación y hundimiento del bloque. Esta innovación tecnológica apunta a intensificar el estado natural de fracturamiento in situ del macizo rocoso, con el propósito de producir una fragmentación fina del mineral al momento de su hundimiento, la cual debería permitir el escurrimiento expedito del mineral hacia los puntos de extracción, permitiendo la operación simultánea de los mismos y aumentando la tasa de extracción desde 0,5 toneladas por m<sup>2</sup>/día a valores potenciales entre 2 y 3 toneladas por m<sup>2</sup>/día.

Dichas innovaciones buscan aprovechar las condiciones antes descritas, utilizando para ello equipos extractores en forma simultánea (extracción continua) en cada uno de los puntos de extracción, los cuales descargan a un sistema de transporte continuo (transportador continuo) que conduce el mineral hacia un equipo fragmentador (“chancador de bajo perfil”)<sup>10</sup> reduciéndolo a un tamaño adecuado para ser transportado por correa.

La principal ventaja de este tipo de innovación, radica en la productividad por unidad de área que es factible lograr, es decir, el aumento de la extracción media con respecto al caso convencional. Adicionalmente, permite incrementar en gran medida la producción, sin aumentar proporcionalmente el área operativa del sistema. Por otro lado, cuenta con las condiciones necesarias para generar una operación altamente

---

<sup>10</sup> Chancador de pequeñas dimensiones, en relación a lo comunmente utilizado en la actualidad.

automatizada y continua, utilizando para ello la remotización, condición que permitiría desplazar a los trabajadores de ambientes contaminados y riesgosos del interior mina.

Los mayores impactos, desde la perspectiva del negocio, se producirían por un aumento de las capacidades productivas, representado por un aumento de la velocidad de extracción y por una disminución de los costos de explotación.

Como primera instancia, de acuerdo a lo señalado por la Corporación, si los resultados son positivos se espera una reducción de costo de US\$ 1 por tonelada extraída por día, lo que equivaldría a US\$ 75 millones al año.

Las investigaciones y estudios tendientes a desarrollar innovaciones tecnológicas en minería subterránea se han desarrollado principalmente en las Divisiones El Salvador, Andina y El Teniente.

Conforme al avance de estas innovaciones se puede señalar que:

- El preacondicionamiento se ha probado en forma exitosa, sin embargo, existen algunos reparos geomecánicos.
- El chancador de bajo perfil cumple con las expectativas de reducir la roca de alta dureza. No obstante, aún se encuentran en análisis los estudios de costos y los estudios que determinarían los parámetros operacionales de este equipo.

### **3.3.2. Innovación Tecnológica en Bio-Hidrometalurgia.**

#### **Biolixiviación de Sulfuros de Baja Ley.**

En Chile, durante la década pasada, la minería privada y Codelco pusieron en funcionamiento operaciones para la biolixiviación de sulfuros secundarios de baja ley. Sin embargo, la recuperación de los metales ha sido baja y la cinética de extracción de los mismos ha sido lenta.

En el año 2002, Codelco junto con la empresa japonesa Nippon Mining & Metals, conformaron la sociedad investigadora Biosigma S.A, cuya propiedad es 66,66% de Codelco y el 33,33% de la compañía japonesa.

El propósito de la sociedad es desarrollar tecnologías en biominería para el procesamiento eficiente de recursos mineros de baja ley, cuya explotación mediante los sistemas tradicionales no es económicamente viable. Este desarrollo tecnológico tiene como objetivo: aumentar la recuperación de metales, acortar la cinética de extracción de los metales, patentar nuevas bacterias y nuevos procesos, y viabilizar en el mediano plazo, los recursos mineros sub-económicos, con el consiguiente ahorro sustancial en los costos de explotación y disminución del impacto ambiental de la minería.

Entre los principales resultados de los dos últimos años de Biosigma fue la identificación de nuevas bacterias que participan en el proceso de biolixiviación de minerales y el secuenciamiento de su genoma.

La tarea para los próximos años, es aplicar estos procedimientos que se estudian en laboratorios, a condiciones comerciales para observar su desarrollo y futura implementación a nivel operacional. Para lograr esta tarea, la sociedad Biosigma está participando en un programa que involucra la aplicación de estos estudios en las Divisiones Andina, Salvador, El Teniente y Codelco Norte.

De acuerdo a lo indicado por la Corporación, existe un potencial de recursos mineros de 50.000 millones de toneladas<sup>11</sup> con una ley media de 0,26% de cobre, lo que permitiría que la compañía duplique la cantidad de producción de cobre fino considerado en sus planes de negocio.

### **Biolixiviación de Concentrados de Cobre.**

En el año 2000, Codelco se asoció con BHPBilliton, formando la sociedad Alliance Copper Ltd. (ACL), para comercializar la tecnología de biolixiviación de concentrados de cobre.

Durante el 2003 se puso en marcha una planta prototipo industrial de propiedad de ACL (División Codelco Norte) de 20 mil toneladas anuales de cobre, con el propósito de demostrar a escala comercial la viabilidad técnica, económica y ambiental del proceso de biolixiviación de concentrados de cobre con microorganismos del tipo termófilos. En el año 2004, se evaluó la aplicación de esta tecnología a los concentrados complejos (con alta impurezas) provenientes del yacimiento Ministro Alejandro Hales (ex-Mansa Mina).

Si los resultados de esta prueba son positivos, la sociedad podrá difundir y comercializar internacionalmente la innovación tecnología desarrollada, pues constituye una alternativa al procesamiento pirometalúrgico de los concentrados de cobre.

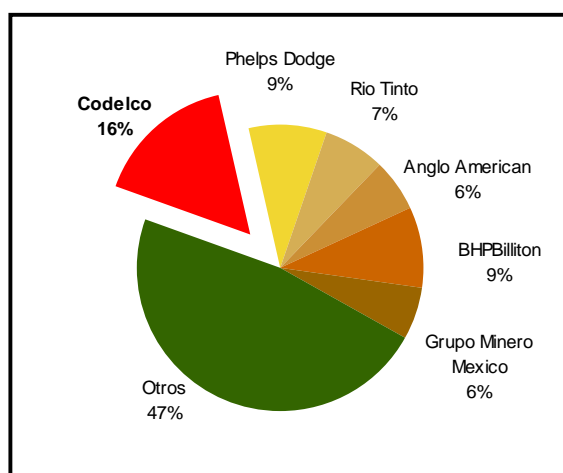
---

<sup>11</sup> Estos recursos mineros yacen principalmente en los tranques de relaves antiguos.

#### 4. Gastos en Investigación e Innovación Tecnológica de las Principales Empresas Productoras de Cobre en el Mundo.

Tal como se ilustra en el Gráfico 3, durante el año 2004 la principal productora de cobre en el mundo fue Codelco, la cual produjo 1,84 millones de toneladas métricas de cobre fino<sup>12</sup>, representando aproximadamente el 16% de la producción del mundo occidental. Por su parte, Phelps Dodge y BHPBilliton, representaron el 18% de la participación del mundo occidental, cada una con un 9%, seguido por el 7% de Rio Tinto, 6% de Anglo American y 6% del Grupo México.

**Gráfico 3**  
**Participación por Empresa en la Producción de Cobre del Mundo Occidental (2004).**



Fuente: Codelco, agosto 2004.

Según lo señalado por John Marsden<sup>13</sup>, la industria minera gasta habitualmente entre 0,1% y 1% de las ventas en I&IT. No obstante, existen empresas que destinan una cantidad mayor de gastos, aunque este valor depende esencialmente del ciclo de precios de los metales. Asimismo, durante el año 2004, Phelps Dodge gastó entre 1,6% y 1,7% de las ventas en I&IT.

En efecto, entre los años 2000 y 2004, Noranda gastó entre 0,2% y 1% de las ventas en I&IT y Rio Tinto desembolsó entre 1% y 1,8% de las ventas.

Por otro lado, tal como es indicado en la Tabla 1, Codelco gastó entre 0,37% y 0,57% de las ventas en el mismo período.

<sup>12</sup> Esta cifra considera la participación en El Abra.

<sup>13</sup> Vicepresidente Senior de Desarrollo Tecnología y Productos, Phelps Dodge.



**Tabla 1**  
**Porcentaje de los ingresos destinados a I&T por Codelco, período 2000-2004.**

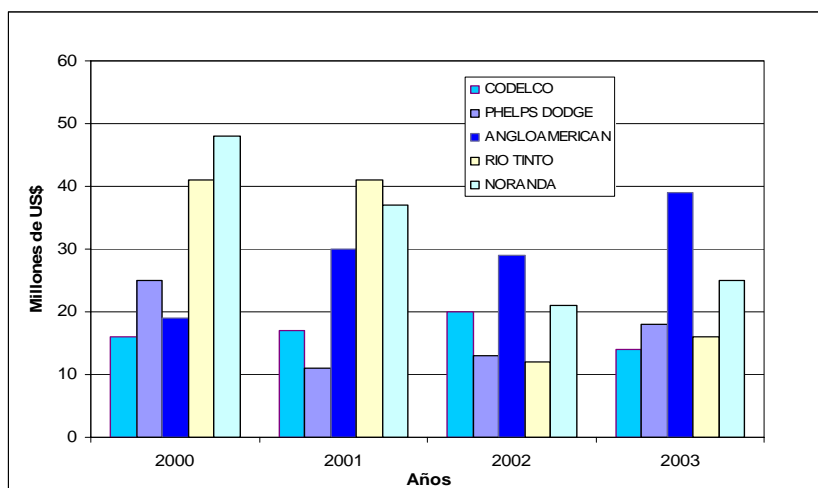
	Unidad	2000	2001	2002	2003	2004
Ingresos de explotación	Mil. US\$	3.610	3.588	3.490	3.782	8.204
Gastos I&T	Mil. US\$	17,0	15,5	20,0	14,0	21,6
% ingresos destinados a I&T	%	0,47	0,43	0,57	0,37	0,26
Producción de cobre	Miles Ton.	1,515	1,592	1,519	1,562	1,733
Precio del cobre	US\$/Lb	82,3	71,6	70,6	80,7	130,1

Fuente: COCHILCO, en base a información de Memorias de Codelco (2000-2004), Sistema de Control de Gestión de las Empresas del Estado, noviembre 2005.

Cabe consignar que en relación a los antecedentes mostrados en la Tabla 1, particularmente durante el año 2004, el porcentaje de las ventas destinadas a I&T por la Corporación disminuyó, a pesar del aumento de los montos asignados en esta materia, debido principalmente al aumento del precio del cobre, lo que incrementó considerablemente las ventas.

Por otra parte, de acuerdo a los antecedentes proporcionados en los reportes anuales de las principales empresas productoras de cobre en el mundo, los gastos destinados a innovación tecnológica bordean entre US\$ 12 millones y US\$ 47 millones, valores señalados en el Gráfico 4.

**Gráfico 4**  
**Gasto en I&T de las Principales Empresas Productoras de Cobre, período 2000-2003.**



Fuente: COCHILCO, en base a información de reportes anuales de las compañías mineras.

Cabe precisar que a excepción de Codelco, los valores antes indicados representan los gastos asignados al negocio global, es decir, a la totalidad de los productos vendidos por estas empresas (polimetálicas).

## 5. Comentarios Finales.

La innovación tecnológica en la industria del cobre se ha caracterizado por adaptar tecnologías de otros sectores mineros. Ejemplo de ello, han sido la adaptación de la flotación, cuya primera aplicación industrial tuvo lugar en la industria del zinc, y la extracción por solventes, la cual proviene de la industria del uranio. Particularmente, estas tecnologías lograron generar cambios radicales en los escenarios adversos de esa época.

En el último tiempo, Codelco ha debido enfrentar nuevas dificultades operativas, lo que ha impulsado a innovar para mantener su competitividad. Entre los principales desafíos que ha debido enfrentar la Corporación es la profundización de sus minas, puesto que a medida que los yacimientos se profundizan disminuye la ley media de cobre y aumenta la dureza asociada a la roca, incidiendo en forma directa sobre los costos de operación de las faenas productivas.

En la actualidad, Codelco ha obtenido interesantes y auspiciosos resultados y avances en el desarrollo de sus tecnologías dirigidas a enfrentar estos desafíos técnicos. La empresa ha sido pionera en la minería mundial en el desarrollo de dos áreas fundamentales: la Bio-Hidrometalurgia y la minería subterránea continua. Estas tecnologías le generarían a la Corporación nuevas oportunidades de negocio dentro de la industria.

Asimismo, si los resultados de esta plataforma tecnológica son positivos, se crearían grandes potenciales de valor en la empresa, puesto que tendría, en primera instancia, una reducción de costo equivalente a US\$ 75 millones por año en minería subterránea, y por otro lado, se posibilitaría el procesamiento recursos mineros de baja ley cercanos a los 50.000 millones de toneladas.

Entre los años 2000 y 2003, los gastos destinados a innovación e investigación tecnológica por Codelco han situado a la Corporación entre las empresas productoras de cobre que asignaron una mayor cantidad de recursos a dichas iniciativas. Cabe consignar que solamente en ese período la compañía gastó alrededor de US\$ 66 millones, en comparación a los US\$ 67 millones de la empresa polimetálica Phelps Dodge.

Por otra parte, la minería chilena no ha estado ausente del proceso de desarrollo tecnológico, sin embargo, le queda mucho camino por recorrer para llegar a las cifras de inversión de países como Canadá, el cual destinó durante el año 2000 US\$ 217 millones<sup>14</sup>, en comparación a los US\$ 51,6 millones<sup>15</sup> invertidos ese mismo año por la minería de nuestro país.

---

<sup>14</sup> "Mining Innovation: An overview of Canada's dynamic, technologically advanced mining industry", Asociación Minera de Canadá, noviembre 2001.

<sup>15</sup> Indicadores Científicos y Tecnológicos, CONICYT, 2004.

## Bibliografía

1. Arbiter Nathaniel y Archive W. Fletcher., *Copper Hydrometallurgy – Evolution and Milestones*, Mining Engineering Magazine, 1994.
2. Brown E.T. *Block Caving Geomechanics*, The International Caving Study Stage I 1997-2000, The University of Queensland, Australia, 2003.
3. C. twigge-Molecey , *Knowledge, Technology and Profit*, COPPER 2003 Volume I-Plenary lectures, economics and Applications of copper Santiago, Chile, 2003.
4. Bartos J. Paul; *The Technology cycle in Mining through space and time: Implication for sustainability*, Mineral Economics and Management Society, Twelfth Annual Conference, Estados Unidos, 2003.  
[www.minecon.com/Proceedings03/PaulBartosdoc.pdf](http://www.minecon.com/Proceedings03/PaulBartosdoc.pdf)
5. *Canada's Top 100 Corporate R&D Spenders 2004*, research Infosource Inc., Canadá, 2004  
[www.researchinfosource.com](http://www.researchinfosource.com)
6. Competitiveness of the U.S. Minerals and Metals Industry  
[www.nap.edu/catalog/1545.html](http://www.nap.edu/catalog/1545.html)
7. Dresher H. William, *How Hydrometallurgy and the SX/EW Process Made copper the "green" metal*, Copper Applications in Mining & Metallurgy, 2001.  
[www.copper.org/innovations/2001/08/hydrometallurgy.html](http://www.copper.org/innovations/2001/08/hydrometallurgy.html)
8. *Indicadores Científicos y Tecnológicos-2004*, CONICYT, Chile, 2004.  
[www.conicyt.cl](http://www.conicyt.cl)
9. Marsden John, *Technology development and Competitive Advantage: Sustainable or Short Term?* Phelps Dodge Mining Company, Estados Unidos, 2004.  
[www.eswp.com/PDF/PEfall04\\_metals13-18.pdf](http://www.eswp.com/PDF/PEfall04_metals13-18.pdf)
10. Mining Association of Canada, *Facts&Figures 2004*, Canadá, 2004.  
[www.mining.ca/english/publications/facts-figures/MAC-FF-04-English.pdf](http://www.mining.ca/english/publications/facts-figures/MAC-FF-04-English.pdf)
11. *Mining Innovation: an overview of Canada's dynamic, technologically advanced mining industry*, Mining Association of Canada, Canadá, 2001.  
[www.mining.ca/english/publications/innovation.pdf](http://www.mining.ca/english/publications/innovation.pdf).
12. *Research and Experimental development 2003-2004*, Australian Bureau of Statistics, Australia, 2004.  
[www.abs.gov.au](http://www.abs.gov.au)

13. Tilton E. John y Landsberg H., Hans *Innovation, Productivity Growth, and the Survival of the U.S. Copper Industry*, Discussion paper, Resources for the Future, Estados Unidos, 1997.  
[www.rff.org/Documents/RFF-DP-97-41.pdf](http://www.rff.org/Documents/RFF-DP-97-41.pdf)
14. ANGLOAMERICAN PLC, Annual Report 2000-2004  
[www.angloamerican.co.uk](http://www.angloamerican.co.uk)
15. CODELCO, Anuarios 2000 - 2004.  
[www.codelco.cl](http://www.codelco.cl)
16. NORANDA, Annual Report 2000 – 2004.  
[www.noranda.com](http://www.noranda.com)
17. PHEPS DODGE, Annual Report 2000 – 2004.  
[www.phelpsdodge.com](http://www.phelpsdodge.com)
18. RIO TINTO, Annual Report and Financial statements 2000 – 2004  
[www.riotinto.com](http://www.riotinto.com)

Este trabajo fue desarrollado por:

**Hernán Vives Navarro**

Con la colaboración de:

**Cristóbal Quezada R.**

Noviembre 2005.