

# Midiendo la innovación en la minería y metalurgia del cobre

Darko M Louit, Gustavo E. Lagos y Andrés Bertens

## INTRODUCCIÓN

Las fluctuaciones en el precio del cobre afectan considerablemente a la minería de este metal. Por consiguiente, para las empresas que trabajan en este campo, y que desean asegurar la continuidad de sus operaciones, mantener bajos los costos de producción ha sido un objetivo de largo plazo. Para alcanzar esta meta, la innovación tiene una importancia prioritaria y por eso las grandes empresas mineras, como una forma de mejorar su competitividad, están constantemente incorporando a sus procesos adelantos tecnológicos.

Otro factor importante en el desarrollo tecnológico de la industria minera ha sido la necesidad de adaptarse a las crecientes demandas de las regulaciones ambientales.

Los factores mencionados más arriba han generado enormes avances, los que han hecho posible la explotación económica de yacimientos que tan solo diez, veinte o treinta años atrás eran considerados económicamente no rentables.

No obstante, es interesante llamar la atención sobre el hecho de que muchas de las tecnologías que actualmente están en uso en la minería del cobre han sido empleadas por más de cincuenta años. Estos son los casos de la refinación electrolítica, introducida primero por Elkington en 1865; la flotación por Potter en 1907; la conversión por Pierce y Smith en 1909; la extracción por solventes para los procesos de purificación del uranio en 1940; la disolución instantánea de Outokumpu en 1949. Y si bien es cierto que estas grandes irrupciones innovadoras tuvieron lugar hace muchos años, las tecnologías que las sustentaban han experimentado desde entonces notables avances, aumentando así su eficiencia. Se han desarrollado igualmente nuevos procesos y metodologías en las áreas de procesamiento de minerales, pirometalurgia, hidrometalurgia, refinación electrolítica, y minería subterránea y de cielo abierto.

Al mismo tiempo que se generaban estas innovaciones, tenía lugar otra transformación, extremadamente interesante. Desde 1970, ha habido una gradual (pero impresionante) migración de la minería (y ciertamente de la minería del cobre) hacia países menos desarrollados (Wagner y Fettweis, 2001). Esto último como consecuencia de los cambios experimentados en las regulaciones tanto mineras como ambientales en países altamente industrializados como Estados Unidos y Canadá, junto con el gradual agotamiento de los yacimientos más ricos de esos países.

En consecuencia, se puede afirmar que los nuevos países que lideran la producción minera intentarán asimismo asumir un rol de liderazgo en el campo de las tecnologías innovadoras para esta industria.

El objetivo de este estudio es medir la contribución a las tecnologías innovadoras en minería y metalurgia del cobre que, desde 1970, han efectuado países y empresas..

Este estudio está estructurado como sigue: la sección 2 presenta la definición de tecnología adoptada; la 3 describe la metodología usada, la 4 muestra los resultados obtenidos. La 5 analiza los mismos poniendo un énfasis mayor en la contribución chilena y, finalmente, la 6 entrega un breve resumen de lo estudiado.

### **DEFINICIÓN DE TECNOLOGÍA**

Para el propósito de este estudio, se define la tecnología como un método basado en la aplicación de un principio científico y dirigido hacia un objetivo. Una tecnología implica la existencia de tres condiciones, las que se enumeran a continuación:

- Generar una efectiva transformación en la manera cómo se hacen las cosas.
- Provocar un mayor progreso capaz de producir beneficios para la industria desde el estado previo de los procesos de interés.
- Lograr una plena aplicación a nivel industrial.

Por consiguiente una nueva tecnología tiene una o más de las siguientes consecuencias:

Incrementa la productividad, brinda mayores márgenes de beneficio, elabora productos de mejor calidad, genera una disminución de los costos de producción, proporciona mayores estándares de seguridad, provoca menores emisiones nocivas, las que se traducen en un menor impacto ambiental.

De aquí resulta que las innovaciones exitosas a nivel de plan piloto, que no se aplican a escala industrial, debido a razones técnicas o económicas, no son consideradas como tecnologías. Por otra parte, algunas innovaciones que se encuentran actualmente en etapa de prueba, pueden ser clasificadas como tales. Es el caso de una planta piloto o de otra que opere solo a nivel industrial local, sin una amplia aplicación industrial, pero con gran potencial para un uso mayor en la industria en un futuro próximo, de acuerdo a la opinión de los expertos, sobre la base de los beneficios derivados de su aplicación. Esta excepción está fundada en el hecho de que la mayoría de los nuevos desarrollos tecnológicos, que usualmente se aplican primero a nivel local, están generalmente asociados al retraso que experimenta su aplicación a un nivel industrial más amplio (Cavender 2000, Bell 2001).

## METODOLOGÍA

La identificación de las tecnologías y la valoración de su impacto han sido manejadas en tres etapas: (i) revisión de patentes, (ii) “tecnología” filtro y (iii) evaluación de impacto. Once expertos participaron activamente a lo largo del proceso, explicitando su opinión en cada etapa.

Las personas que han colaborado como expertos en este estudio son académicos respetados u ostentan importantes cargos en la industria y son reconocidos como peritos en sus respectivos campos en la industria minera chilena.

Diez de ellos tienen PhD y grados post doctorales en prestigiosas universidades norteamericanas o europeas. Nueve son chilenos. Los expertos provienen de las siguientes áreas:

- Procesamiento de minerales y cominución: 2
- Pirometalurgia: 4
- Hidrometalurgia: 3 (2 son asimismo expertos en Electrorefinación)
- Electrorefinación: 2
- Operaciones mineras: 2

Más abajo se describe cada nivel metodológico.

### REVISIÓN DE PATENTES

Se ha realizado en Internet una extensa revisión de las bases de datos de patentes de los gobiernos de Chile (Departamento de Propiedad Industria), Estados Unidos (*Delphion intellectual property*) y Unión Europea (*European Patent Office*). La selección de estas bases de datos se funda en el supuesto de que, siendo Chile el mayor productor de cobre, muchas de las patentes relativas a inventos y procedimientos aplicables a la minería de este metal habrían sido registradas tanto en Chile como en el país donde se originó su desarrollo y también en Estados Unidos, que es, asimismo, un gran productor de cobre (antiguamente, el más grande). Este supuesto está basado en el hecho de que, normalmente, las patentes son registradas por sus autores en los grandes mercados potenciales.

El objetivo de esta búsqueda se ha centrado en las patentes con un fuerte énfasis en la explotación del cobre y en su metalurgia extractiva. Lógicamente se han descartado algunas innovaciones, puesto que el campo de sus aplicaciones no está referido exclusivamente al cobre sino a la extracción de otros metales o minerales. Por lo mismo, los adelantos realizados en otras áreas como la electrónica o la ingeniería mecánica no han sido considerados.

Para la revisión de esta fase se ha prestado especial atención a los detalles, de manera que las modificaciones menores de los procesos o procedimientos existentes han sido dejados fuera del análisis.

Se han realizado varias investigaciones fundadas en palabras clave, autor (empresa) y título. Se han revisado solo las patentes posteriores a 1970.

Las patentes identificadas como relevantes para el estudio han sido clasificadas de acuerdo a su área de aplicación (procesos de extracción minera y cominución, flotación, pirometalurgia, hidrometalurgia, electrorefinación, operaciones de extracción y exploración) y a su país de origen. De acuerdo al informe de tres bases de datos, se considera país de origen al país natal del autor o de los autores de cada patente.

Todas las patentes reunidas, están acompañadas, en cada caso, de una breve descripción y, con el objetivo de detectar probables omisiones de innovaciones relevantes, han sido revisadas por los correspondientes expertos.

En este contexto se han identificado 283 patentes. (Se puede encontrar una lista completa en Bertens 2001. Su distribución por área puede verse en la Tabla I.)

**TABLA I – DISTRIBUCIÓN DE PATENTES RELEVANTES POR ÁREA DE APLICACIÓN**

Área	Número de patentes	% del total
Procesamiento minero y cominución	41	14,5
Pirometalurgia	65	23,0
Hydrometalurgia	78	27,6
Electrorefinación	48	17,0
Operaciones de extracción	48	17,0
Exploración	3	1,1

### **FILTRO “TECNOLÓGICO”**

En esta etapa, se pidió a los expertos que determinaran si las patentes identificadas en su campo de expertizaje reunían los requerimientos de la definición de tecnología dada más arriba. Como resultado de este filtro, solo 176 de las 283 seleccionadas fueron aceptadas como “tecnologías”. Asimismo, se llevó a cabo, en cada área incluida en la Tabla I, una clasificación más detallada. La Tabla II muestra el número de tecnologías identificadas por sub-área.

## EVALUACIÓN DE IMPACTO

Durante las entrevistas que se sostuvieron, los expertos asignaron un impacto a cada tecnología identificada para su área. El impacto fue evaluado sobre la base de dos categorías vigentes para todas las tecnologías, con la excepción de la pirometalurgia, donde se agregó una tercera categoría, relativa a la calidad del ambiente. Las categorías consideradas para la evaluación fueron:

- Grado observado de la aplicación industrial (amplitud del uso)
- Incremento de la productividad o reducción de los costos derivados de la aplicación
- Mejoramiento de la calidad del ambiente (solo para la pirometalurgia)

No obstante las categorías señaladas más arriba, los expertos no descartaron el mejoramiento de la calidad ambiental como factor asociado con las innovaciones - en otras áreas que no fueran las de la pirometalurgia. Indirectamente, este último factor fue incluido en el contexto de categoría de uso y se asumió que las tecnologías amigables y/o seguras para el ambiente pueden llegar a tener una aplicación industrial más amplia. En pirometalurgia fue posible identificar aquellas que están especialmente orientadas a mejorar la calidad del ambiente.

El método para la evaluación se basó en una escala relativa de tres niveles para cada categoría: “alta”, “media”, “baja”. Se asignó a las tecnologías un índice de notas de acuerdo a las siguientes reglas: un nivel “alto” se indica con 5 puntos, uno “medio” con 3, y uno “bajo” con 1.

En el caso en que dos o más expertos manifestaran diferencias de opinión, se consideró como representativo el modelo o referencia de cada categoría. La suma de los puntajes de las dos categorías evaluadas fue entonces calificada como puntaje total para el conjunto de las tecnologías. En el caso de las tecnologías de la pirometalurgia, solo aquellas con puntajes más altos fueron contempladas en el puntaje total. Una matriz de tecnología de impacto fue construida en base a estas ponderaciones.

El sistema de puntaje permitió comparar de una manera más significativa la contribución de cada país a la generación de tecnologías. Esta comparación se basó en el impacto producido más que en el número de las tecnologías generadas.

TABLA II – DISTRIBUCIÓN DE TECNOLOGÍAS POR ÁREAS DE APLICACIÓN

Área	Cantidad de tecnologías
Procesamiento de minerales y comminución	
Chancado	3
Molienda	11
Flotación	5
Filtrado	6

Pirometalurgia	
Fusión y conversión	33
Refinación y moldeo	3
Hidrometalurgia	
Lixiviación	25
Extracción por solventes	21
Electrobtención	8
Electrorefinación	23
Operaciones mina	
Perforación	17
Tronadura	4
Carga y transporte (*)	4
Control de producción (cielo abierto)	6
Otros (seguridad operacional, metodos de explotación)	4
Exploración	3

(\*) Innovación destinada a grandes equipos de carga y transporte no son considerados en este análisis, debido a que resulta de avances en los campos de ingeniería mecánica y de materiales.

## RESULTADOS

### CANTIDAD DE TECNOLOGÍAS POR ÁREA

Como se puede ver en la Tabla II, los mayores perfeccionamientos tecnológicos ocurrieron en el área de la Hidrometalurgia (31 % de las tecnologías identificadas fueron clasificadas en esta), especialmente en lixiviación y técnicas de extracción por solventes. De hecho, estas innovaciones condujeron a una explotación masiva de los yacimientos de cobre de más bajo grado, al tiempo que la producción mundial de cátodos a través de la lixiviación, extracción por solventes y electrobtención (SX-EW) aumentó de 769.000 toneladas a 2.300.000 toneladas entre los años 1991-2000 (Ocaranza et al. 2001). De acuerdo a la opinión de los expertos, esta área no ha alcanzado aún su nivel de maduración con respecto a la investigación y al desarrollo, y se espera que ella continúe produciendo cambios tecnológicos para la industria del cobre. En ella merecen una mención especial las técnicas de biolixiviación de sulfuros.

En este periodo de análisis la pirometalurgia ocupó el segundo lugar (20 %) como responsable del mayor número de nuevas tecnologías, dentro de la cual la fundición y la conversión fueron los procesos más frecuentes. Los procesos de conversión continua - incluida la implementación del horno Flash para una amplia escala de operaciones industriales, (aunque este fuera diseñado en 1940) - fueron identificados como los mayores impulsores del desarrollo. Con respecto a la calidad del ambiente, los procedimientos usados en las plantas de tratamiento de ácidos y la captación de gases fugitivos fueron considerados por los expertos entrevistados como los más importantes.

Se consideró que la extracción minera es responsable del 19 % de las innovaciones tecnológicas, pero esta evaluación puede no ser representativa de la situación real en el área. En efecto, en la etapa de revisión de las patentes los adelantos que condujeron a un mayor equipamiento no fueron considerados, pero sí fueron reconocidos posteriormente por los expertos como factores de mayor perfeccionamiento. Nos proponemos incorporar estos resultados en nuestras futuras valoraciones. Las innovaciones en los equipos de perforación subterránea y la automatización de los sistemas de información fueron clasificadas como los principales avances obtenidos.

Los procesos de extracción representaron el 14 % de las nuevas tecnologías identificadas, con la cominución mostrando los mayores adelantos, especialmente en relación a los procesos de control e instrumentación.

La electrorefinación fue considerada responsable del 13 % de las nuevas tecnologías, entre las cuales se consideró el nuevo ánodo de aleación y los dispositivos dirigidos a mejorar las prácticas operacionales como las mayores innovaciones en el área.

#### **CANTIDAD DE TECNOLOGÍAS POR PERÍODO**

En el curso de las últimas tres décadas, el número de los adelantos tecnológicos ha crecido a un ritmo sostenido promedio de 30 % cada cinco años. Entre 1991 y 1995 se constató un explosivo aumento de 90 % con respecto a los cinco años anteriores.

Es interesante anotar que el período más productivo (1991-1995) coincidió con un alto precio del cobre. El mismo comportamiento pudo ser observado entre 1986 y 1990, cuando - comparando este tramo con los cinco años anteriores - se constató un gran aumento en la cantidad de los nuevos adelantos. Después de 1995, cuando el precio del cobre comenzó a disminuir, se observó un derrumbe del 50 % en los nuevos desarrollos tecnológicos con respecto a los cinco años anteriores (Figura 1). No obstante, y como resulta evidente en la Figura 1, los altos precios no siempre conllevan una mayor generación de nuevas tecnologías. Si bien lo anterior no es concluyente, puede ser indicativo de una dependencia de la investigación y de los presupuestos de desarrollo con respecto al precio del cobre. Esta relación afecta a casi todas las áreas, en particular a la pirometalurgia, a los procesos mineros y a las operaciones de extracción. La hidrometalurgia ha sido, en cambio, una excepción, porque en esa área los nuevos desarrollos no declinaron después de 1995. Se pueden encontrar ejemplos de lo anterior en los esfuerzos de investigación hechos en el campo de la biohidrometalurgia por las grandes compañías tales como BHP-Billiton y Codelco-Chile, por medio de su *joint venture*, Alliance Copper.

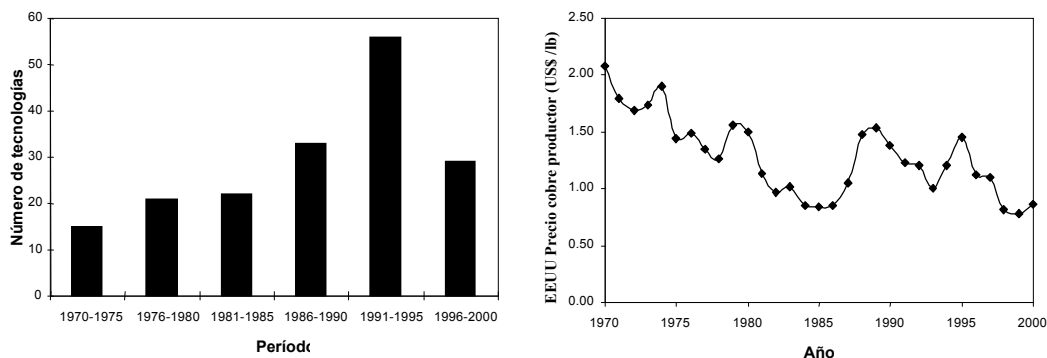


FIGURA 1 – NÚMERO DE DESARROLLOS TECNOLÓGICOS Y PRECIO DE COBRE.

### CANTIDAD DE TECNOLOGÍAS POR PAÍS DE ORIGEN

Como ha sido mencionado más arriba, un país de origen fue asignado a cada tecnología. En muchos casos, el autor de la patente clasificada como tecnología era una empresa, de manera que en ese caso se consideró como país de origen al país de la empresa. Los resultados se muestran en la Tabla III.

Canadá es el país que ostenta el mayor aporte de contribuciones a las nuevas tecnologías, seguido por Estados Unidos, con 41 y 34 tecnologías, respectivamente. Esto era previsible, considerando que ambas se encuentran entre las naciones más industrializadas del mundo y tienen una larga tradición minera.

TABLA III – DISTRIBUCIÓN DE TECNOLOGÍAS POR PAÍS DE ORIGEN

País	Cantidad de tecnologías
África del Sur	10
Alemania	6
Australia	12
Canadá	41
Chile	22
Estados Unidos	34
Finlandia	19
Gran Bretaña	2
Japón	15
Suecia	15

La presencia de Chile en el tercer lugar con 22 contribuciones es, de alguna manera, sorprendente. A pesar de ser un gran productor de cobre y de haber perfeccionado y desarrollado la extracción minera en forma superior a la de otros sectores de su economía, aún presenta un nivel de investigación y una tasa de desarrollo relativamente bajos (World



Bank Group 1986). Las contribuciones chilenas se han concentrado especialmente en las áreas de la fundición y de la hidrometalurgia.

Países como Finlandia, Suecia y Australia son generalmente reconocidos como importantes actores en el mundo de la tecnología de extracción minera, pero como este estudio está enfocado principalmente al cobre, el número de nuevas tecnologías asignadas en este caso a estos países ha sido menor de lo que podría haberse esperado, con 19, 15 y 12 contribuciones, respectivamente. Esto no significa que no se hayan tomado en cuenta los éxitos alcanzados en el área de la extracción minera y en los procesos de equipamiento y *software* especializado (particularmente en Australia). La industria de extracción minera de Sudáfrica es igualmente muy importante, especialmente en relación a sus metales preciosos. Pero, debido al limitado alcance de este estudio, su contribución (10 nuevas tecnologías) puede haber sido subestimada.

Japón, con sus numerosas operaciones en el área de la fundición, ha tenido un rol importante en el desarrollo de la pirometalurgia y 11 de sus 16 contribuciones se asocian a esta área.

Alemania y Gran Bretaña han hecho su contribución en las áreas de la hidrometalurgia y de procesamiento de minerales.

Como se ha mencionado anteriormente, la mayor parte de las tecnologías identificadas fueron patentadas por empresas mineras. La Figura 2 muestra el número de tecnologías que pueden ser atribuidas a varios actores industriales. Como puede verse en ella, de las 69 empresas que presentaron al menos una patente clasificada como tecnología, 10 pueden ser consideradas responsables por más del 50 % de los adelantos tecnológicos. Dentro de este grupo, INCO Ltda. y Outokumpu Oy son dos empresas que originaron, individualmente, el mayor número de nuevas tecnologías en el periodo 1970-2000.

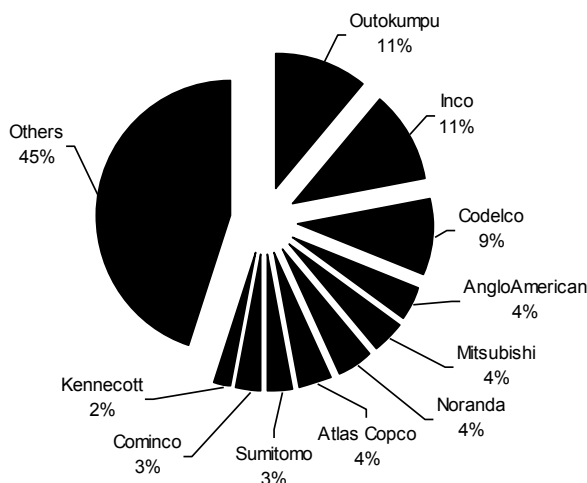


FIGURA 2 – NÚMERO DE TECNOLOGÍAS DESARROLLADAS POR EMPRESAS, 1970-2000.

La sección siguiente muestra el impacto producido por las nuevas tecnologías identificadas en el estudio.

## IMPACTO DE LAS TECNOLOGÍAS POR PAÍS DE ORIGEN

La Tabla IV muestra el número de categorías evaluadas como “Alta”, “Media” y “Baja” y el puntaje ponderado para cada país. Anotemos el hecho de que, cuando se estimó el total del puntaje para una tecnología, - y aunque solo dos categorías fueron consideradas - la suma de las categorías fue estimada igual al doble de la cantidad de tecnologías mostradas en la Tabla III.

TABLA IV – IMPACTO TOTAL POR PAÍS

País	Impacto.(categorías)			Puntaje	
	Bajo	Medio	Alto	Ponderación total	% total
África del Sur	12	6	2	40	5
Alemania	2	6	4	40	5
Australia	6	11	7	74	9
Canadá	36	31	15	204	24
Chile	29	10	5	84	10
Estados Unidos	35	22	11	156	19
Finlandia	17	13	8	96	11
Gran Bretaña	0	3	1	14	2
Japón	17	8	5	66	8
Suecia	14	14	2	66	8

De lo anterior se puede concluir que Canadá es el país que ha realizado la mayor contribución al desarrollo de las nuevas tecnologías en extracción del cobre y en metalurgia, con el 24 % del total de la ponderación del puntaje (considerando tanto la cantidad de tecnologías como su impacto). En segundo lugar están los Estados Unidos con un 19 %, seguidos por Finlandia y Chile con 11 % y 10 %, respectivamente. Si ahora nos concentramos solo en la categoría de impacto “Alto”, Chile baja al quinto lugar, después de Canadá, Estados Unidos, Finlandia y Australia.

Entonces, cuando calculamos el puntaje promedio por tecnología (*Average Score per Technology ASPT*) definido como la ponderación de este puntaje dividido por la cantidad de tecnologías y estimado como el puntaje del impacto promedio de la contribución de cada país, se obtienen los valores, indicados en la Figura 3 .

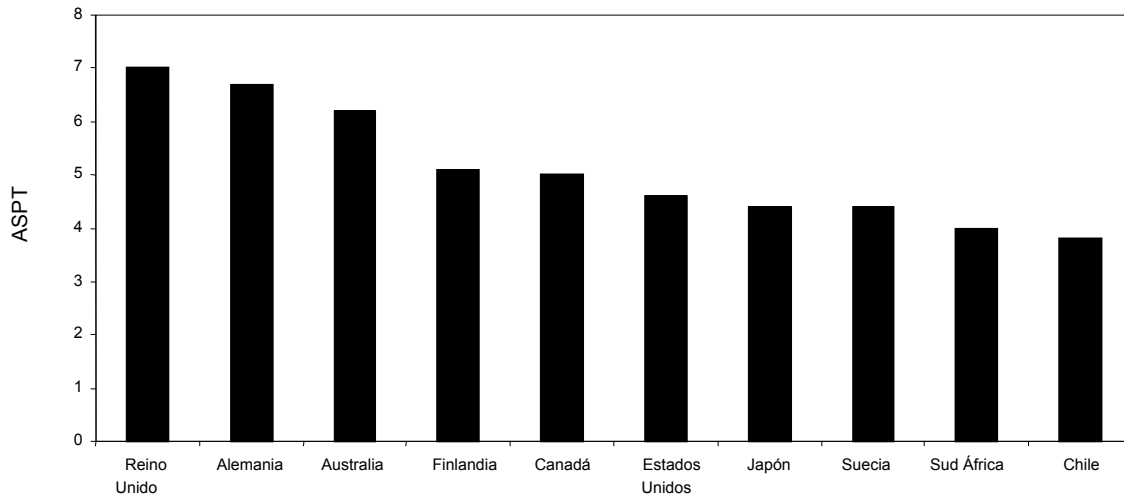


FIGURA 3 - PUNTAJE MEDIO POR TECNOLOGÍA (ASPT, 1970-2000)

La Figura 3 muestra que, a pesar de la baja cantidad de tecnologías atribuibles a Alemania y a Gran Bretaña, ellas han producido un gran impacto porque el promedio de puntaje por tecnología para ambos países excede los 6 puntos. En esta misma categoría se encuentra Australia, seguida por Finlandia, Canadá y los Estados Unidos. Luego, Suecia, Japón, África del Sur y Chile obtienen promedios de puntaje similares, que varían entre 3,8 y 4,4.

Chile ostenta un tercer lugar en la cantidad total de las nuevas tecnologías desarrolladas pero, comparado con otros países, el promedio de su impacto es relativamente bajo. Esta no es una observación menor, puesto que países como Chile están enfrentando el desafío de liderar los futuros desarrollos en extracción minera (particularmente en extracción del cobre). La siguiente sección de este estudio intentará identificar las razones de este bajo impacto promedio.

## DISCUSIÓN

Es evidente que algunos países en donde la minería es importante para las respectivas economías nacionales, como es el caso de Australia, Canadá, África del Sur y Chile, han contribuido, en los últimos treinta años, al desarrollo de la extracción del cobre y de las tecnologías metalúrgicas. Este no es el caso de países como Perú, Zambia y Zaire los que no han contribuido al desarrollo de estas tecnologías, a pesar de que la extracción minera y particularmente la del cobre son importantes para sus economías.

De acuerdo a un estudio de Elliot y Pye (R.N. Elliot y M. Pye, 1998) los procesos de investigación y desarrollo (*Investigación y Desarrollo*, I&D) son los que hacen posible que las ideas nuevas puedan ser desplegadas y transformadas en productos comerciales y servicios. Es entonces la innovación la que alimenta el crecimiento económico y permite a la industria obtener ganancias eficientes. Con el objetivo de generar innovaciones tecnológicas efectivas, tanto en el corto como en el largo plazo, ha sido identificado un

conjunto de factores críticos. El primero de ellos es la necesidad de la existencia de una política nacional que promueva iniciativas que se complementen y sean capaces de articular una estrategia industrial coordinada, capaz de incentivar la investigación y el desarrollo y de hacer factible para la industria la adopción de tecnologías y prácticas eficientes. En este caso se debe incentivar asimismo al sector específico de las políticas de extracción minera. En segundo lugar, la industria debe también estar motivada para incrementar su inversión en I&D. La creación de un régimen impositivo especial para estos gastos, las facilidades que se puedan otorgar a la investigación cooperativa entre empresas, Gobierno y academias constituyen algunos de los medios que se pueden usar para alcanzar estos fines. En este sentido los recursos invertidos en I&D para la extracción y la metalurgia son buenos indicadores de la posición de cada país. En tercer lugar, la comercialización de las innovaciones no debe ser desechada, porque los grandes riesgos asociados con la innovación indisponen a las empresas a expandir el uso de las tecnologías desarrolladas por ellas.

La actividad de I&D en un país, reflejado en los gastos asignados a esta área, es uno de los factores diferenciadores principales entre países, y esto tiene que ser tomado en consideración al momento de hacer comparaciones. Las clasificaciones de Canadá, los Estados Unidos, Alemania, y el Reino Unido por I&D (gasto de I&D como porcentaje de PIB) están entre las más altas del mundo. De acuerdo al Banco Mundial (World Bank Group, 201 ó 2001?), países como Australia, Finlandia, y Suecia también muestran una alta clasificación por I&D, seguidos por Sudáfrica, y Chile. Otro indicador interesante relacionado al I&D es el número de ingenieros y científicos cualificados dedicados a la investigación y desarrollo en un país (Durand, 1998). Este indicador muestra una tendencia similar en los gastos de I&D en relación al PIB de cada país. Entonces, es posible decir que el impacto promedio del desarrollo tecnológico de un país está relacionado con el nivel de I&D del mismo, debido a que este promedio es mayor para países más industrializados, independientemente de la importancia de la minería en sus economías.

Canadá y los Estados Unidos, identificados en este estudio como los países con mayores contribuciones en tecnología de extracción del cobre y en metalurgia, presentan las dos condiciones mencionadas más arriba, esto es que ellos no solo lideran la inversión en I&D, sino que también son poseedores de una gran industria minera. Chile, por otra parte, tiene una baja proporción de inversión en I&D, pero la relativa importancia de su minería del cobre ha originado importantes innovaciones, lo que eleva su rango al cuarto lugar en el cuadro total de las contribuciones (Tabla IV).

No obstante, el puntaje promedio alcanzado por Chile en contribución tecnológica coloca al país en el último lugar en la lista (Ver Figura 3), ya que las tecnologías identificadas son numerosas pero de escaso impacto, excepto contadas excepciones. Si bien esta situación puede explicarse debido a las pobres contribuciones chilenas en I&D, existen algunos factores particulares que han estado influenciando el impacto que la contribución de Chile ha tenido en el desarrollo de las nuevas tecnologías. La mayor parte (81 %) de las tecnologías chilenas han sido desarrolladas ya sea por Codelco-Chile o por el CIMM (Empresa Estatal de extracción del cobre y Centro de Investigaciones en extracción y metalurgia, respectivamente). Consecuencia de lo anterior es el hecho de que fuera de Chile y de Codelco ha habido una escasa aplicación de las tecnologías, ya que es la Empresa y no

el Gobierno quien tiene claridad en las políticas con respecto a la comercialización de los adelantos tecnológicos. Según la opinión de los expertos, las dos mayores contribuciones chilenas son: (i) el proceso de lixiviación en pilas pequeñas y (ii) el convertidor del Teniente para la fundición del cobre, que constituyen una excepción, por cuanto estos procedimientos están actualmente siendo usados en diversas operaciones alrededor del mundo.

La patente original del proceso de lixiviación en pilas pequeñas pertenece a Holmes y Narver, dos ciudadanos americanos, pero fue una empresa chilena, la Sociedad Minera Pudahuel, quien la implementó a nivel industrial, permitiendo así expandir el proceso de autorización y del *know-how* a otras empresas alrededor del mundo. El convertidor del Teniente fue desarrollado por Codelco-Chile y está actualmente en uso en fundiciones en Chile, Perú, México, Zambia y las Filipinas.

En el curso de los últimos 10 ó 15 años la posición de Chile con respecto a las políticas de I&D, así como a la colaboración con instituciones tanto locales como extranjeras, ha mejorado. Pero al mismo tiempo el presupuesto de investigación para el CIMM ha sido dramáticamente rebajado, de manera que sus esfuerzos de investigación se han visto asimismo muy disminuidos. Esto ha dejado al país con un solo actor importante en el campo de las actividades de I&D en relación a la industria de extracción minera. Hay asimismo varias universidades con experiencia en los sectores de extracción y metalurgia, pero ellas cuentan con muy pocos recursos. Para adquirir una posición de liderazgo en el futuro en este campo, Chile deberá encaminar sus esfuerzos hacia la obtención de una efectiva disponibilidad de los factores críticos para una tecnología del desarrollo; lo que conlleva políticas claras y fuentes preferenciales de recursos.

Finalmente, la industria minera no se caracteriza por destinar amplios recursos para la investigación y el desarrollo. Un estudio reciente muestra que la inversión en I&D en ella alcanza un porcentaje que varía entre el 0,5 % y el 1,5 % de la venta bruta, cuando en cambio en la industria manufacturera, el porcentaje se acerca al 3,5 % (Durand 1998). Existe una seria preocupación con respecto a este producto minero que aparentemente ha ingresado a un largo periodo de precios bajos lo que, de acuerdo a nuestras conclusiones, debería resultar en una disminución de la inversión en I&D en el curso de los próximos años. Además, estas tendencias están destinadas a afectar igualmente la producción futura de Chile en relación a tecnologías extractivas y metalúrgicas.

## **RESUMEN Y OBSERVACIONES FINALES**

Durante el periodo transcurrido entre 1970 y 2000, se crearon 176 nuevas tecnologías con aplicación directa para la extracción y la metalurgia del cobre. La mayor parte de estas fue clasificada como hidrometalúrgica con un énfasis en lixiviación y extracción por solventes. Estos adelantos permitieron la explotación de yacimientos de baja ley que habían sido considerados, no hacía muchos años, como económicamente no rentables. La pirometalurgia y las operaciones de extracción ocuparon, respectivamente el segundo y el tercer lugar en la cantidad de nuevas tecnologías.

En el curso de los últimos treinta años, hubo un constante incremento en la cantidad de innovaciones entregadas a la industria y clasificadas como tecnologías. Este incremento osciló en un porcentaje cercano a un 30 % cada cinco años, siendo el periodo más productivo aquel comprendido entre los años 1991-1995. Después de 1995, y coincidiendo con una sostenida declinación del precio del cobre, la cantidad de nuevas tecnologías desarrolladas sufrió una disminución del 50 %, lo que afectó a cada proceso del área con la excepción de la hidrometalurgia, en donde la investigación en biohidrometalurgia se mantuvo muy activa.

De acuerdo con este estudio, Canadá es el país que más ha aportado al desarrollo de las nuevas tecnologías en extracción y metalurgia del cobre en el periodo analizado, tanto por la cantidad de sus innovaciones como por el impacto de estas. Canadá es seguido por Estados Unidos, Finlandia, Chile y Australia. Otros importantes actores identificados fueron Suecia, Japón y Sud África.

A la luz de los resultados que se han mostrado aquí, se puede concluir que los dos factores que han ejercido la mayor influencia en la participación de un país en el desarrollo de nuevas tecnologías en extracción minera y en metalurgia (particularmente extracción del cobre y metalurgia) son: (i) el tamaño de su industria minera en relación a la producción mundial, (ii) la capacidad del país para fomentar y apoyar la investigación y, en general, el desarrollo de actividades en el área. Naturalmente, la conjugación de los dos factores facilita la innovación y por eso algunos países donde se encuentran minas de gran importancia tales como Zaire y Zambia, pero donde la capacidad de I&D<sup>1</sup> es muy baja, no fueron identificados como aportando al desarrollo tecnológico de la industria.

Los autores tienen la convicción de que todos los expertos consultados realizaron evaluaciones objetivas, pero como muchos de ellos trabajan en la industria minera chilena, el impacto de algunas tecnologías originadas en otros países puede haber sido subestimado.

Los responsables de este artículo esperan asimismo que este estudio sea considerado por los expertos en extracción y metalurgia del cobre, como una invitación a colaborar en la promoción y el desarrollo de los procesos innovadores en nuestra industria.

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores aprecian profundamente la participación de once expertos entrevistados durante este estudio. Ellos son los señores: Sergio Bustos, Peter Calder, Aldo Casali, Esteban Domic, Peter Knights, Antonio Luraschi, Jorge Menacho, Alfonso Otero, Gabriel Riveros, Jaime Sepúlveda y Andrzej Warczok.

---

<sup>1</sup> Investigación y Desarrollo

## REFERENCIAS

- Wagner, H. y G. B. L. Fettweis, “About science and technology in the field of mining in the western world at the beginning of the new century”, *Resources Policy*, Vol. 27, N° 3, September 2001, 157-168.
- Cavender, B., “Rethinking the use of new technology to improve operational performance”, *Mining Engineering*, Vol. 52, N° 12, December 2000, 61-67.
- Bell, S., “Mining smarter, Technologies to watch”, *Australia’s Mining Monthly*, February 2001, 29-38.
- Departamento de Propiedad Industrial de Chile, página web <http://www.dpi.cl/>
- Delphion intelectual property, página web <http://www.delphion.com/>
- European Patent Office, página web <http://www.european-patent-office.org/>
- Bertens, J. A., “Innovaciones tecnológicas en la minería del cobre y la contribución chilena”, Bachelor of Engineering Thesis, Pontificia Universidad Católica de Chile, 2001, Santiago.
- Ocaranza, J., O. Arce y V. Pérez, Estadísticas del cobre y otros minerales: 1991-2000, *Chilean Copper Commision*, July 2001, Santiago.
- World Bank Group, *World Development Indicators*, International Bank for Reconstruction and Development, The World Bank, 1998, Washington, D.C.
- Elliot, R. N. y M. Pye, “Investing in industrial innovation: a response to climate change”, *Energy Policy*, Vol. 25, N°. 5, 1998, 413-423.
- World Bank Group, *World Development Report 2000-2001: Attacking Poverty*, International Bank for Reconstruction and Development, The World Bank, 2001, Washington, D.C.
- Durand, O., “Innovaciones tecnológicas en minería y metalurgia”, *Revista Minería Chilena*, año 13, N° 157, Julio 1998, 75-95.