

**Comisión Chilena del Cobre**  
**Dirección de Estudios**

**EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO  
DE LA MINERÍA DEL COBRE DE CHILE. 2001 – 2007  
DE / 013 / 08**

Registro de Propiedad Intelectual  
© N° 176302

## INDICE

<b>GLOSARIO</b>	<b>1</b>
<b>RESUMEN EJECUTIVO</b>	<b>2</b>
<b>I INTRODUCCION</b>	<b>12</b>
<b>II. METODOLOGÍA</b>	<b>15</b>
2.1 Alcance, Unidad Funcional y Exclusiones	15
2.2 Datos de entrada	16
2.3 Cálculos	17
2.3.1 Uso de Energía	17
2.3.2 Emisiones Directas	18
2.3.3 Emisiones Indirectas – Consumo de Combustibles	18
2.3.4 Emisiones Indirectas – Abastecimiento de Energía Eléctrica	19
2.3.5 Demanda Unitaria de Energía y Carga de Emisión	19
2.3.6 Concentrados y Ánodos de Cobre de Fuentes Externas	19
<b>III ANALISIS DE RESULTADOS</b>	<b>21</b>
3.1 Producción, Uso Global de Energía y Emisiones de GEI	21
3.2 Uso de Energía y Emisiones de GEI por Áreas de Producción	25
3.2.1 Consumo de Energía	25
3.2.2 Emisiones de GEI por Áreas	26
3.3 Demandas Unitarias de Energía y Cargas Unitarias de Emisión por Productos	37
3.3.1 Concentrados	37
3.3.2 Ánodos	39
3.3.3 Cátodos ER	41
3.3.4 Cátodos EO	43
3.3.5 Cátodos ER versus Cátodos EO	45
<b>IV CONCLUSIONES Y COMENTARIOS</b>	<b>48</b>
<b>IV. BIBLIOGRAFIA</b>	<b>51</b>
<b>ANEXO 1 - Faenas Mineras Incluidas en el Estudio</b>	<b>52</b>

## GLOSARIO

**CDEC:** Centro de Despacho Económico de Carga

**CNE:** Comisión Nacional de Energía

**CUE:** Carga Unitaria de Emisión

**DUE:** Demanda Unitaria de Energía

**EW:** Electroobtención

**GEI:** Gases de Efecto Invernadero

**GJ:** Gigajoule =  $10^9$  Joule

**GWh:** Gigawatt-hora =  $10^6$  Kilowatt-hora = 3,6 Joule

**IPCC:** Intergovernmental Panel on Climate Change

**LX:** Lixiviación

**SIC:** Sistema Interconectado Central

**SING:** Sistema Interconectado del Norte Grande

**SX:** Extracción por Solvente

**TJ:** Terajoule =  $10^{12}$  Joule

**TMF:** Tonelada Métrica de Cobre Fino

## RESUMEN EJECUTIVO

Dada la importancia del sector minero en la actividad productiva nacional - particularmente de la minería del cobre - y los profundos cambios que ha experimentado la matriz energética nacional en los últimos años, como resultado de los problemas de abastecimiento de gas natural, COCHILCO resolvió actualizar el estudio publicado a comienzos del 2008<sup>1</sup> con los datos correspondientes al año 2007, para analizar los efectos de estos cambios en las emisiones de GEI generadas por la minería del cobre.

Para desarrollar el trabajo se ha utilizado la misma metodología que en la versión anterior, donde la cuantificación de las emisiones de GEI se realiza sobre la base de la aplicación de una metodología propuesta por el Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). El punto de partida de este ejercicio lo constituye la determinación del consumo de energía del sector productivo según tipos de combustible, a partir del cual - utilizando factores predeterminados en sendas tablas de emisión de GEI por tipos y uso de combustibles - se calculan las emisiones GEI asociadas a este consumo. Dichas emisiones corresponden principalmente al dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y, con fines de estandarización, las emisiones de otros GEI, como el CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O, se expresan habitualmente en términos de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente, utilizando los correspondientes factores de conversión.

Al igual que en ocasiones anteriores, se contó con una amplia colaboración de las empresas del sector para la entrega de la información requerida, por lo que este estudio cubre un 99% de la producción de cobre del país del año 2007.

En el presente estudio el período de análisis se acota a los últimos 7 años, comprendidos entre el 2001 y el 2007, ya que en este período la mayoría de las faenas mineras que entraron en operación a mediados de la década del 90 se encuentran operando a régimen, lo que permite análisis más representativos.

En términos más específicos, cada empresa minera informó para cada una de sus áreas de operación (mina, concentradora, fundición, refinería electrolítica, tratamientos de minerales lixiviables y servicios, según correspondía) lo siguiente: (i) consumo total anual directo de los distintos tipos de combustibles fósiles (carbón, diesel, gasolina, fuel oil, kerosene, gas licuado y gas natural); (ii) consumo total anual de energía eléctrica, reflejo de consumo indirecto de combustibles utilizados para generar la energía;

---

<sup>1</sup> "Emisiones de Gases de Efecto Invernadero de la Minería del Cobre de Chile. 1995-2006". [http://www.cochilco.cl/productos/fr\\_mercado.html](http://www.cochilco.cl/productos/fr_mercado.html)

(iii) producción total anual de cobre fino por áreas; y (iv). Autogeneración de energía eléctrica.

A esos datos se agregó la información - proporcionada por los respectivos CDEC<sup>2</sup> de los principales sistemas eléctricos (SING y SIC)<sup>3</sup> - sobre los consumos de cada uno de los combustibles utilizados en la generación eléctrica en cada central térmica. Utilizando factores de conversión estandarizados se determinó para cada año y para cada sistema de generación un factor unitario de emisión de GEI.

De este modo, integrando la información de las faenas mineras con aquella proveniente de los respectivos CDEC, y con la ayuda de factores de conversión estandarizados que relacionan consumo de combustible con consumo de energía y con emisiones de GEI, fue posible calcular el consumo unitario de energía y las emisiones unitarias de GEI, incluyendo tanto las emisiones directas como las indirectas para cada faena minera, por área de proceso y producto. Para calcular el consumo unitario de energía del sector minero en su conjunto (38 faenas), se ponderaron los consumos unitarios de cada faena minera por sus respectivas producciones.

El alcance del estudio es el mismo que en la versión anterior, en el sentido que cubre las emisiones de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, y N<sub>2</sub>O, que son los GEI relevantes para el caso de la minería del cobre; se limita a las emisiones directas e indirectas de GEI; incluye todos los procesos mineros, desde la extracción del mineral hasta la producción de los concentrados y cátodos de cobre; los productos incluidos en el inventario son concentrados de cobre, ánodos de cobre, cátodos electro-refinados (cátodos ER) y cátodos electro-obtenidos (cátodos EO); y la unidad funcional del estudio es 1 tonelada métrica de cobre fino (TMF).

## **PRINCIPALES RESULTADOS**

### **Emisiones de GEI de los sistemas de generación eléctrica**

El estudio determinó que en el SIC el consumo de energía eléctrica destinada a la producción de cobre aumentó en un 48,7%, de 17.414

---

<sup>2</sup> CDEC: Centros de Despacho Económico de Carga. Son los organismos encargados de la coordinación de la operación de las instalaciones eléctricas de los concesionarios que operan interconectados entre sí, con los objetivos de preservar la seguridad del servicio en el sistema eléctrico; garantizar la operación más económica para el conjunto de las instalaciones del sistema eléctrico; y garantizar el derecho de servidumbre sobre los sistemas de transmisión establecidos mediante concesión.

<sup>3</sup> El SING es un sistema interconectado de abastecimiento de energía eléctrica que territorialmente cubre la zona norte del país hasta Taltal. Por su parte el SIC es el sistema interconectado que abastece de energía eléctrica la zona centro sur del país.

Terajoule (TJ) en el 2001 a 25.888 TJ en el 2007 (17,4% de la generación neta del SIC). El aumento en el SING, durante el mismo período, fue de un 36,3%, desde 27.967 TJ a 38.107 TJ (80,5% de la generación neta del SING). El consumo total de energía eléctrica del sector minería del cobre representó en el año 2007 aproximadamente un 32% del consumo total de energía eléctrica del país.

Asimismo, el estudio concluye que en el año 2001 en el SIC se emitieron 204,8 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente/GWh generado, mientras que en el SING se emitieron 637,0 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente/GWh. Es decir, en ese año, el SING emitió 3,1 veces más GEI que el SIC por cada GWh generado. En el año 2007, en cambio, esa relación se redujo a sólo 2,7 veces (344,1 toneladas y 915,1 toneladas, respectivamente).

Lo anterior es el resultado de los cambios ocurridos en ambas matrices de generación eléctrica en el período analizado. Por una parte, el SING, prácticamente 100% térmico, en el año 2001 el 55,8% de la generación era con gas natural, que tiene un factor de emisión unitario de GEI menor que los otros combustibles, mientras que en el año 2007 el 57,6% de la energía eléctrica fue generada con carbón.

En el SIC, por su parte, aumentó la participación de la generación térmica en desmedro de la generación hidroeléctrica y además se sustituyó el gas natural por diesel y carbón, lo que se tradujo en un incremento en las emisiones de GEI de este sistema.

### **Consumo de energía y emisiones GEI asociados a la producción de cobre**

En el período bajo análisis, el consumo total de energía para la producción de cobre de Chile (que incluye las áreas mina, concentradora, fundición, refinera, tratamiento de minerales lixiviables (LX/SX/EW) y servicios a la producción) creció en mayor medida que la producción.

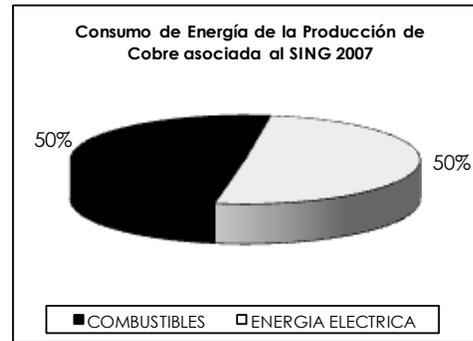
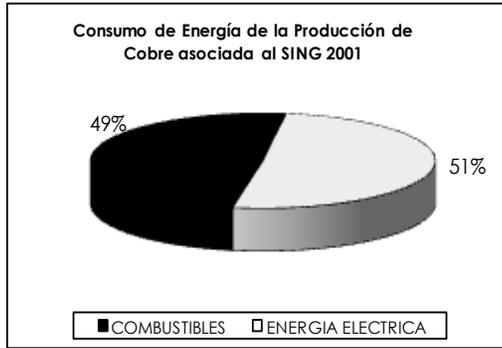
Los resultados indican que mientras la producción total de cobre aumentó en 17,3% en el período de 7 años (de 4,74 millones de toneladas en 2001 a 5,56 millones de toneladas en el año 2007), el consumo total de energía se incrementó en 36,8%, (de 85.105 Terajoule en 2001 a 116.403 Terajoule en el año 2007). La energía consumida como combustibles se incrementó entre 2001 y 2007 en un 32%, mientras que el consumo de energía eléctrica lo hizo en 41%, lo que se explica principalmente por la entrada en operación de proyectos hidrometalúrgicos, que son altamente consumidores de energía eléctrica, e incrementos en la dureza del mineral, que involucran un mayor consumo de energía eléctrica en los procesos de conminución.

Por su parte, las emisiones GEI crecieron en un 83% (de 8,9 a 16,3 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente en el año 2007). Esto responde, fundamentalmente, a las modificaciones que han experimentado los sistemas de generación eléctrica producto del déficit de abastecimiento de gas natural.

La producción de cobre asociada al SING incrementa sus emisiones de GEI en mayor proporción (79,3%) que el aumento del consumo de energía (36,8%), lo que se debe a que este sistema de generación incrementó en el período su emisión unitaria en un 44% por los cambios de combustibles utilizados para la producción de electricidad. En el SIC, los incrementos en la emisión de GEI (97,2%) fueron proporcionalmente aún mayores que aquellos del consumo de energía (36,8%), debido a que la emisión unitaria de ese sistema aumentó aún más que en el SING (68%).

Específicamente, los coeficientes unitarios de consumo de energía de la producción de cobre a nivel nacional se mantienen, con algunas fluctuaciones, relativamente estables, incrementándose en el período en un 17%, mientras que aquellos de emisión de GEI muestran una tendencia creciente, en particular en los dos últimos años, aumentando en los 7 años en un 56%. Lo anteriormente detallado se explica, fundamentalmente, por las siguientes causas:

- i) El incremento en la emisión unitaria de GEI en ambos sistemas de generación, como resultado de la sustitución del gas natural por carbón y diesel, cuyos factores unitarios de emisión de GEI son superiores a los del gas natural, y además, un aumento de la generación térmica en el SIC en desmedro de la generación hidráulica.
- ii) El incremento de la producción de cobre proveniente de las faenas abastecidas por el SING de un 64% del total de producción nacional en el año 2001 a un 67,4% en el año 2007.
- iii) La reducción del consumo directo de combustible en los procesos de fundición, debido a la incorporación de cambios tecnológicos en esa área productiva como fue la sustitución de hornos de reverbero por hornos de fusión autógena. Este efecto es particularmente relevante en el SIC.

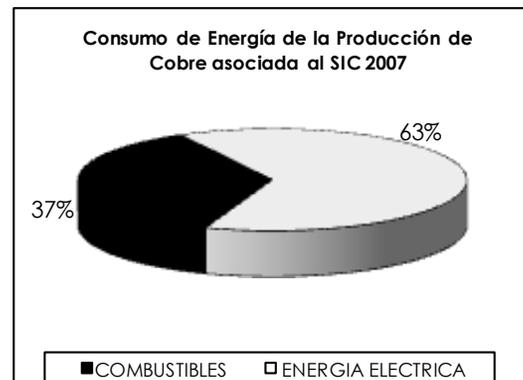
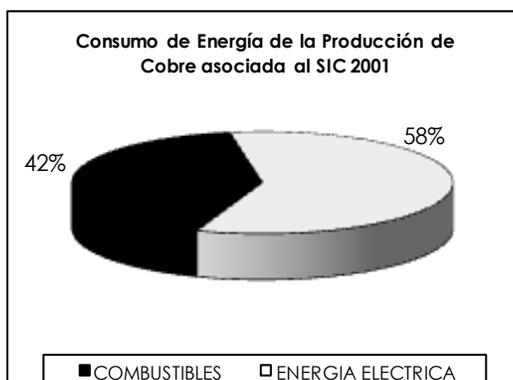


### Matriz Energética del SING 2001 y 2007

COMBUSTIBLE	2001	2007
Diesel	3,8%	16,4%
Petróleo Combustible	5,0%	3,0%
Carbón Bituminoso	35,0%	57,6%
Gas Natural	55,8%	22,6%
<b>Total Generación Térmica</b>	<b>99,6%</b>	<b>99,5%</b>
<b>Total Generación Hidráulica</b>	<b>0,4%</b>	<b>0,5%</b>
<b>Total Generación</b>	<b>100,0%</b>	<b>100,0%</b>

Fuente: Elaborado sobre la base de los Anuarios CDEC SING 1993-2002 y 2007

El aumento en el consumo de energía eléctrica en las faenas asociadas al SIC se debe, además de la mencionada incorporación de hornos de fusión autógena, que hacen uso intensivo de oxígeno, y que redujo los consumos de combustible, también al aumento del consumo de energía eléctrica con la instalación de sistemas de captación, manejo y tratamiento de gases (plantas de ácido) y plantas de oxígeno en las fundiciones, para cumplir con las normas ambientales. Cabe recordar que 5 de las 7 fundiciones del país se abastecen de energía eléctrica del SIC.



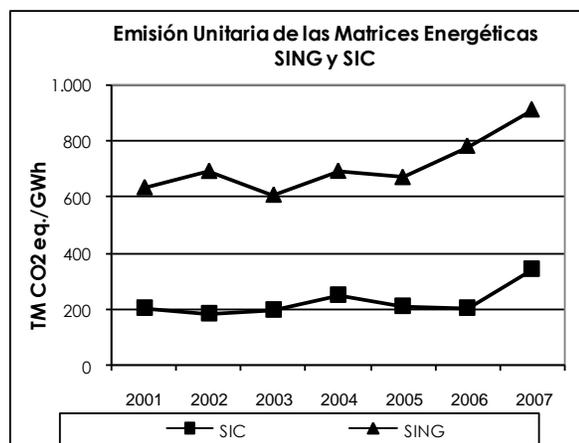
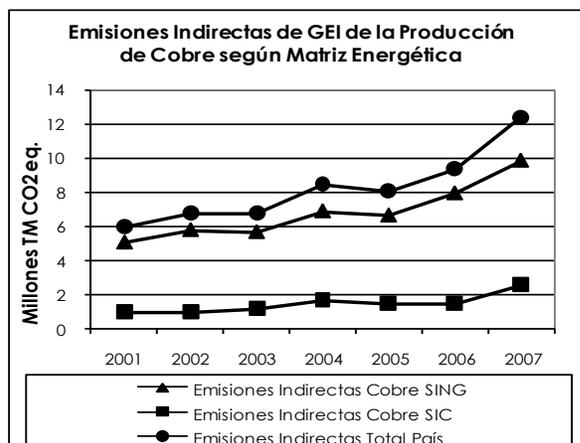
### Matriz Energética del SIC 2001 y 2007

COMBUSTIBLE	2001	2007
Diesel	5,39%	48,45%
Petróleo Combustible		0,92%
Coke de Petróleo		2,44%
Carbón Bituminoso	29,55%	31,32%
Gas natural	61,07%	13,31%
Desechos forestales + Licor Negro	3,98%	3,55%
<b>Total Generación Térmica</b>	<b>31,6%</b>	<b>47,13%</b>
<b>Total Generación Hidráulica</b>	<b>68,4%</b>	<b>52,86%</b>
<b>Total Generación Eólica</b>		<b>0,01%</b>
<b>Total Generación</b>	<b>100,0%</b>	<b>100,0%</b>

Fuente: Elaborado sobre la base de Anuario CDEC SIC 2002 y 2007

Los altos porcentajes de generación en base a diesel es una situación transitoria, que se mantendrá mientras se normaliza el abastecimiento de gas natural, con la construcción de las plantas de gas natural licuado (GNL), y la entrada en operación de centrales de generación a carbón.

Es conveniente aclarar que, tal como se muestra en los gráficos siguientes, aún cuando las emisiones unitarias del SING se incrementaron en un 44%, mientras las del SIC aumentaron en un 68% en el período de 7 años, las primeras siguen siendo muy superiores, debido a la predominancia de la generación térmica en ese sistema ubicado en regiones áridas donde no existen cursos de agua con potencial hidroeléctrico.



Fuente: Elaborado por la Comisión Chilena del Cobre en base a información de las empresas, el CDEC y la CNE.

### Consumos de Energía y Emisiones por Áreas de Procesos

El estudio determinó que en el año 2007, las principales áreas de proceso consumidoras de energía eran la mina rajo (30% del total de la energía directa e indirecta consumida por el sector), la concentradora (26%), el tratamiento de minerales lixiviables (21%) y la fundición (13 %).

Para efectos de analizar más en profundidad la evolución del consumo de energía de cada área de proceso en el período de estudio, conviene considerar la demanda unitaria de energía de cada una de ellas, esto es, el gasto de energía para producir una tonelada de cobre fino contenido en el producto de cada etapa. Desde esta óptica, destacan tres resultados del estudio como los más interesantes.

Primero, la mina subterránea presenta una menor demanda unitaria de energía que la mina rajo durante todo el período de análisis. Esto se explica porque la primera extrae directamente mineral - sin remover lastre o estéril - y lo hace con un método de explotación que hace uso de la fuerza de gravedad. La minería de rajo, por su parte, debe movilizar - con ayuda de maquinaria pesada consumidora principalmente de combustibles - grandes cantidades de lastre o estéril para poder acceder al mineral.

Segundo, si bien, como se sabe, la producción de cobre por la vía de lixiviación (LX), extracción por solventes (SX) y electroobtención (EW), utiliza importantes cantidades de energía eléctrica, la suma de los consumos unitarios de energía de las áreas concentradora, fundición y refinera, en el tratamiento pirometalúrgico de minerales sulfurados, es superior a aquella del tratamiento hidrometalúrgico. Es decir, el consumo unitario de energía es superior al producir cobre metálico por la vía pirometalúrgica que por la vía hidrometalúrgica.

Tercero, el área de fundición destaca por una disminución de la demanda unitaria de energía, la que en el período baja en un 11%. Esto se debe a cambios tecnológicos impulsados por el necesario cumplimiento de la normativa ambiental, que indujo el cambio de hornos reverbero por hornos de fusión autógena, con la consecuente disminución de consumo de combustibles.

Por otra parte, el cálculo de las emisiones GEI totales por área del proceso demuestra que las principales áreas generadoras de emisiones son: la concentradora (32% del total de emisiones directas e indirectas generadas por el sector), el tratamiento de minerales lixiviables (29%), la mina rajo (20%) y la fundición (11%).

A continuación se muestra la evolución de los valores de las cargas unitarias de emisión (CUE), por áreas de producción, para el período que abarca el estudio.

### Cargas Unitarias de Emisión por Áreas

	Unidades	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
<b>Mina Rajo</b>	TM CO <sub>2</sub> eq. /TMF mineral	0,37	0,39	0,39	0,38	0,42	0,44	0,47
<b>Mina Subterránea</b>	TM CO <sub>2</sub> eq. /TMF mineral	0,14	0,14	0,15	0,17	0,20	0,22	0,31
<b>Concentradora</b>	TM CO <sub>2</sub> eq. /TMF concentrado	0,70	0,78	0,80	0,92	0,92	1,04	1,40
<b>Fundición</b>	TM CO <sub>2</sub> eq. /TMF ánodo	0,86	0,85	0,79	0,84	0,81	0,86	1,08
<b>Refinería</b>	TM CO <sub>2</sub> eq. /TMF cátodo ER	0,23	0,24	0,22	0,24	0,25	0,22	0,30
<b>LX-SX-EW</b>	TM CO <sub>2</sub> eq. /TMF cátodo EO	1,74	1,94	1,80	2,06	1,92	2,21	2,67
<b>Servicios</b>	TM CO <sub>2</sub> eq. /TMF total producido	0,12	0,12	0,11	0,10	0,10	0,10	0,11

**Fuente:** Elaborado por la Comisión Chilena del Cobre en base a información de las empresas.

### Consumos de Energía y Emisiones por Productos

El estudio calcula los consumos de energía y las emisiones de GEI asociadas a la producción de concentrados, ánodos, cátodos electrorefinados (ER) y cátodos electroobtenidos (EO), diferenciando según el sistema eléctrico que los abastece.

En relación a los concentrados, el estudio concluye que, si bien los consumos de energía para producir una tonelada de cobre fino contenido en la forma de concentrado, son relativamente similares en ambas matrices energéticas (SING 12,8 Gigajoule/TMF y SIC 16,2 Gigajoule/TMF en el año 2007), las cargas unitarias de emisión de cada uno de ellos difieren sustancialmente, siendo la de los concentrados SING entre 1,6 y 2,4 veces superior a la de los concentrados SIC. Esto es el resultado de lo ya señalado: alto consumo de energía eléctrica en la concentradora y mayor generación térmica en el SING.

En el año 2007 casi un 40% de la producción chilena de cobre se exportó como concentrados y el resto como cobre metálico. Dentro de esta última categoría se produjeron 0,99 millones de TMF de cátodos electrorefinados (ER) y 1,83 millones de TMF de cátodos electroobtenidos (EO). Otro de los principales resultados del estudio llevado a cabo por COCHILCO es que, en ese año, si bien la producción de un cátodo ER demandó un 16% más de energía que la producción de uno EO (29,9 versus 25,1 Gigajoule, respectivamente), emitió un 5% menos de GEI (3,63 versus 3,81 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente, respectivamente).

Es decir, la comparación de cátodos ER y EO demuestra que, aún siendo los cátodos ER más consumidores de energía, los cátodos EO emiten, en términos unitarios, una mayor cantidad de GEI. Esto, debido a que el

abastecimiento de la energía necesaria para la producción de estos últimos proviene fundamentalmente del SING que, como ya se ha señalado, posee un mayor factor de emisión de GEI.

## **ALGUNAS REFLEXIONES FINALES INCLUIDAS EN EL ESTUDIO**

El punto más relevante de destacar de la actualización al año 2007 de este estudio es que los resultados muestran que se revierte la tendencia observada desde el año 1995, en el sentido que tanto los consumos de energía como las emisiones crecían de manera correlacionada con la producción de cobre, pero siempre en un porcentaje inferior a ésta.

Los resultados al año 2007, en cuanto al aumento de los consumos totales y unitarios de energía en el período que comprende el estudio, que se explican por una multiplicidad de factores, tales como disminuciones en la ley de los minerales, aumento de las distancias de acarreo, cambios en la cartera de productos comerciales y cambios tecnológicos, están indicando que el sector minería del cobre, en esta década, ha experimentado un aumento en la intensidad de uso de energía.

Otro hecho relevante en materia de consumo de energía del sector minería del cobre es que también se revierte la tendencia a incrementar el consumo de electricidad en desmedro de los combustibles, que alcanzó su punto culminante el año 2004, con una participación de la energía eléctrica de un 57,5% del consumo total de energía del sector, para reducirse este valor en el año 2007 a un 55%.

Las dificultades en el abastecimiento de gas natural se ven reflejadas en los resultados obtenidos para las emisiones del sector, en especial en los últimos 4 años. Las emisiones unitarias totales de GEI experimentan un aumento de 56%, alcanzando en el 2007 un valor de 2,93 TM CO<sub>2</sub> equivalente / TMF producido. Esto es producto, por una parte, de una menor generación hidráulica en particular en el SIC, y por otra, de los problemas de abastecimiento de gas natural, que ha significado la necesidad de sustituir, en gran escala, gas natural por otros combustibles (carbón y diesel), con coeficientes unitarios de emisión mucho más elevados, en las plantas de generación de energía eléctrica

El aumento de las emisiones unitarias totales se ha visto impulsado, principalmente, por el aumento de las emisiones indirectas que crecen en el período en un 108%, debido al fuerte incremento de los coeficientes unitarios de emisión de ambos sistemas de generación. Además, la participación de las emisiones indirectas (uso de energía eléctrica) en las emisiones totales del sector aumenta de un 67% a un 76% el año 2007.

En términos de emisiones de GEI, la conclusión más evidente es la cada vez mayor relevancia que tiene el perfil de emisiones del sistema interconectado de generación de electricidad sobre el perfil de emisiones de las distintas áreas y, en último término, del producto unitario. En el año 2007, un 55% del consumo de energía en la producción de cobre era energía eléctrica, por consiguiente, resulta claro que, en importante medida, futuras reducciones de emisiones GEI de la minería dependen del diseño de políticas energéticas eficientes en términos de emisiones GEI, para los sistemas de generación eléctrica.

Sin embargo, también es claro el desafío directo que la temática del calentamiento global, asociada a la emisión de GEI, presenta a la minería, sector clave de la economía chilena, más aún si se tiene en consideración el aumento en la intensidad de uso de energía que ha experimentado la actividad en los últimos años. El sector minero, que ha sido proactivo, y a veces pionero, en materia de gestión ambiental en Chile, enfrenta la posibilidad de avanzar gradualmente, anticipándose y contribuyendo al buen diseño de eventuales regulaciones en materia de emisiones de GEI. Los resultados de este estudio facilitan a las empresas mineras el proceso de identificar las áreas de producción donde hay mayores oportunidades para implementar proyectos de eficiencia energética y reducción de emisiones de GEI, incluyendo oportunidades de desarrollo de negocios a través del Mecanismo de Desarrollo Limpio con transacción de bonos de carbono.

## I. INTRODUCCION

La minería contribuye a las emisiones de GEI en dos formas principales. En primer lugar, hay emisiones “in situ” resultantes de la combustión de combustibles fósiles, asociadas principalmente a los procesos de transporte, calentamiento, secado y procesamiento del material. Por otra parte, y lo que es más importante, la minería consume grandes cantidades de energía eléctrica, la mayor parte de la cual es generada por procesos que involucran la combustión de combustibles fósiles. También hay una pequeña contribución proveniente de las emisiones generadas por los procesos de producción de los combustibles utilizados por el sector, la que fluctúa alrededor del 1% del total de las emisiones originadas en la actividad de la minería del cobre.

A menudo, los inventarios de emisiones de GEI asignan las primeras emisiones al sector minero, mientras que las provenientes de la generación de energía eléctrica se informan como parte del sector productor de energía. Sin embargo, desde el punto de vista de Inventario y Evaluación de Ciclo de Vida esta distinción no es relevante, ya que en esta metodología todas las emisiones asociadas a un ciclo productivo, independiente de donde se hayan generado, son parte del perfil de impacto ambiental del producto que está siendo analizado. No obstante lo anterior, desde el punto de vista de Gestión del Ciclo de Vida la distinción es útil, y los escasos trabajos disponibles sobre emisiones de GEI que se han abordado con un enfoque metodológico de ciclo de vida informan las primeras como emisiones “directas” y las segundas como emisiones “indirectas”.

Otra diferencia importante entre los dos enfoques es que los inventarios de ciclo de vida expresan las emisiones como unidades de sustancia emitida por unidad de producto, mientras que los inventarios de emisiones informan el volumen total de emisiones durante un período de tiempo. Así, los resultados del ciclo de vida son más fáciles de analizar desde el punto de vista del perfil ambiental de los productos o de la optimización de la eco-eficiencia de una unidad de proceso.

Chile, como parte de la Convención y del Protocolo de Kyoto, ha realizado inventarios de sus emisiones de GEI<sup>4</sup>. Aunque Chile no está entre los países con compromisos de reducción de emisiones, la posibilidad de usar el mecanismo de desarrollo limpio (MDL) para desarrollar proyectos orientados a la reducción de ellas ha generado varias iniciativas en ese sentido.

---

<sup>4</sup> Inventario de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero. Energía, Procesos Industriales y Uso de Solventes. Chile 1986-1998 (2000).

Según la información contenida en el Inventario realizado por Chile, en 1998 la industria chilena del cobre aportaba el 4,4% del total de las emisiones de CO<sub>2</sub> del país<sup>5</sup>. Sin embargo, este valor incluye sólo las emisiones directas asociadas al transporte, procesos y servicios y excluye las emisiones indirectas asociadas a la generación de la electricidad consumida por la industria minera del cobre.

El cobre se obtiene a partir de dos tipos de minerales: sulfuros y óxidos o minerales lixiviables. Los minerales sulfurados de cobre se someten a molienda, concentración, fundición y electro-refinación. Esto se denomina procesamiento pirometalúrgico e incluye: reducción de tamaño; flotación selectiva para producir concentrados de cobre; separación del cobre del hierro y el azufre a través de una serie de reacciones de oxidación y reducción en la fundición; y un paso final de purificación que se logra a través de una refinación electrolítica para obtener un cátodo electro-refinado (cátodo ER). La reducción de tamaño, que involucra chancado y molienda, hace un uso intensivo de energía eléctrica, la que en la mayoría de los casos es generada mediante procesos que involucran emisiones de GEI en lugares fuera del sitio de la operación minera. El transporte de materiales entre unidades de procesamiento y el uso de calor en algunos procesos involucra la combustión de combustibles fósiles en el lugar de la operación. Aunque la mayor parte del calor requerido en la fundición se genera por las reacciones exotérmicas de oxidación de los sulfuros de los concentrados, las fundiciones hacen uso intensivo de energía, tanto eléctrica como combustibles. La etapa de fundición también libera importantes volúmenes de anhídrido sulfuroso (SO<sub>2</sub>), un compuesto que no tiene un potencial significativo de GEI, pero que sí tiene otros impactos ambientales relevantes. Actualmente todas las grandes fundiciones capturan y tratan la mayor parte de las emisiones de SO<sub>2</sub> en plantas especiales de tratamiento de gases para producir ácido sulfúrico.

Los minerales oxidados o lixiviables de cobre se someten a un procesamiento hidrometalúrgico: chancado, lixiviación ácida, extracción por solvente y electro-depositación (SX-EW), obteniéndose cátodos electro-obtenidos (cátodos EO). Aunque el procesamiento hidrometalúrgico es menos intensivo en el uso de energía en la etapa de chancado que la producción de concentrados de cobre, el bombeo y recirculación de soluciones durante las etapas de extracción por solvente y electro-depositación significa un importante consumo de electricidad.

---

<sup>5</sup> Inventario 1986-1998, Anexo A-25.

De los resultados obtenidos en el anterior estudio de emisiones de GEI elaborado por COCHILCO y los resultados para el año 2007, se observa que, en el caso particular de la minería del cobre de Chile, los procesos hidrometalúrgicos tienen un potencial de calentamiento global (PCG) mucho más alto que los procesos pirometalúrgicos, lo que confirma los resultados de un análisis genérico de ciclo de vida de la producción de cobre, realizado por Norgate and Rankin<sup>6</sup>, cuyas estimaciones se basaron en la escasa información disponible sobre uso de energía y emisiones. Si esta comparación resulta ser generalmente válida, se podría plantear un interesante dilema: desde un punto de vista ambiental, la hidrometalurgia se presenta a menudo como una opción mucho más “limpia”, ya que no incluye la operación de fundiciones con sus problemas de emisiones muy visibles y altos costos de limpieza de gases, sin embargo, desde el punto de vista global sería ambientalmente menos sustentable porque generaría una mayor cantidad de GEI.

En el año 2007, de una producción total mundial de cobre refinado primario de casi 18 millones de toneladas métricas, el 84,4% se produjo por métodos pirometalúrgicos y el 15,6% por extracción por solvente y electrodepositación. En el mismo año, Chile produjo 2,94 millones de toneladas de cobre refinado, de las cuales el 62,4% se produjo por la vía hidrometalúrgica. Por lo tanto, en Chile, aunque a nivel mina se extrae más cobre de minerales sulfurados que de minerales oxidados o lixiviables, se producen más cátodos por métodos hidrometalúrgicos que pirometalúrgicos, exportándose el excedente de cobre proveniente de minerales sulfurados en la forma de concentrados de cobre para ser procesados en el exterior. Esto refleja un incremento mundial en la proporción de cátodos de cobre producidos hidrometalúrgicamente desde comienzos de la década de los 90, una tendencia que ha sido más marcada en Chile que en el resto del mundo<sup>7</sup>.

Chile es el principal productor de cobre del mundo, con una producción de 5,56 millones de toneladas de cobre fino en el año 2007, proveniente de empresas de la Gran, Mediana y Pequeña Minería. Este estudio considera la información proporcionada por 38 faenas mineras<sup>8</sup>, cuyas operaciones abarcan casi cualquier combinación posible existente en la industria en

---

<sup>6</sup> T.E. Norgate and W.J. Rankin. Life Cycle Assessment of Copper and Nickel Production. CSIRO Minerals, Clayton, Victoria, Australia. Published in Proceedings, Minprex 2000, International Conference on Minerals Processing and Extractive Metallurgy, September 2000, pp133-138

<sup>7</sup> Anuario de Estadísticas del Cobre y Otros Minerales 1988-2007. Comisión Chilena del Cobre.

<sup>8</sup> Ver detalle en Anexo 1

cuanto a tipo de mineral, tipo de mina y tecnología de procesamiento, cubriendo el 99% de la producción chilena de cobre del año 2007.

En este estudio se aborda el tema de las emisiones directas e indirectas de GEI asociadas al ciclo de vida de la cuna a la puerta de concentrados, ánodos y cátodos de cobre. El énfasis de este estudio está en generar información respecto de las emisiones de GEI de la minería del cobre en Chile, para sus productos comerciales más relevantes (concentrado de cobre, cátodos electrorefinados, cátodos electroobtenidos y ánodos) y áreas de procesos (mina, concentradora, fundición, refinera, lixiviación-extracción por solventes-electroobtención, y servicios) y cuantificar el impacto de la matriz energética en las emisiones de productos y procesos.

El trabajo intenta realizar una comparación de los inventarios de ciclo de vida de GEI de los diferentes productos y operaciones de la minería del cobre, restringida al consumo operacional de combustibles y emisiones externas asociadas al uso de energía eléctrica de los procesos y la producción de los combustibles utilizados. Por lo tanto, los datos de energía y emisiones que aquí se presentan no incluyen los consumos de energía y las emisiones aguas arriba asociadas a la producción de insumos de procesos que no sean combustibles y energía eléctrica.

## **II. METODOLOGÍA**

### **2.1 Alcance, Unidad Funcional y Exclusiones**

En relación con el alcance del estudio se tiene lo siguiente:

- Aún cuando el Protocolo de Kyoto considera seis gases de efecto invernadero, que son: dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ), óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), hidrofluorocarbonos (HFCs), perfluorocarbonos (PFCs) y hexafluoruro de azufre ( $\text{SF}_6$ ), el presente inventario se circunscribe a las emisiones de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ , y  $\text{N}_2\text{O}$ , puesto que éstos son los GEI relevantes para el caso de la minería del cobre.
- El estudio se limita a las emisiones de GEI de dos tipos: i) emisiones directas, que corresponden a aquellas generadas por la combustión de combustibles fósiles (petróleo, nafta, carbón, gas natural) en las faenas mineras o el usado en transporte por los vehículos de las empresas; ii) emisiones indirectas, que corresponden a aquellas generadas por las instalaciones que producen la energía eléctrica utilizada por los procesos del sector y las emisiones generadas por los procesos de producción de los combustibles utilizados por las faenas mineras.
- El sistema en estudio incluye todos los procesos mineros, desde la extracción del mineral hasta la producción de los concentrados y cátodos de cobre, subdivididos en algunos procesos unitarios genéricos.

Por lo tanto, la producción de molibdeno no se aborda en forma separada (los consumos de energía y sus correspondientes emisiones se asocian exclusivamente a los productos de cobre).

- La unidad funcional del estudio es 1 tonelada métrica de cobre fino (TMF), de manera que todos los datos de consumo de energía y emisión de GEI están normalizados por tonelada métrica de cobre fino contenido en una forma dada de producto.
- Los productos incluidos en el inventario son: concentrados de cobre; ánodos de cobre; cátodos electro-refinados (cátodos ER); y cátodos electro-obtenidos (cátodos EO).
- El estudio se acota al período comprendido entre los años 2001 y 2007, ya que en este período la mayoría de las faenas mineras que entraron en operación a mediados de la década del 90 se encuentran operando a régimen, lo que permite análisis más representativos de los cambios experimentados, tanto en el sector minero, como en la matriz energética del país.
- Se excluyen todas las emisiones de GEI generadas por actividades humanas asociadas a las operaciones mineras (transporte de los trabajadores a la planta, etc.), ya que normalmente estas actividades están externalizadas y no es posible acceder a información respecto de los consumos energéticos. Sin embargo, se incluyen todos los usos de energía en servicios asociados a la producción.
- No se incluyen las emisiones de GEI generadas por otras compañías bajo contrato con las faenas mineras, ya que obtener esta información no es posible por el momento, y, además, involucra principalmente contratación de mano de obra, por lo que no constituye una exclusión relevante para los resultados del estudio.
- Tanto la fundición como la refinería electrolítica pueden recibir materiales de fuentes externas.

## **2.2 Datos de entrada**

Para el período que cubre el estudio, tanto los datos anuales de producción como los de uso de combustibles y electricidad los obtuvo la Comisión Chilena del Cobre de las respectivas faenas mineras para elaborar el estudio "Coeficientes Unitarios de Consumo de Energía de la Minería del Cobre 2001-2007".

Los datos de uso de combustibles están separados por empresa, mina, proceso unitario (mina, concentradora, fundición, refinería y lixiviación/extracción por solvente / electrodeposición), tipo de combustible (diesel, kerosene...etc.) y tipo de uso (hornos, secadores, transporte, etc.). La información respecto de consumo de energía eléctrica se separó de la misma forma. Los datos de producción incluyeron:

toneladas de mineral extraído y procesado (con su correspondiente contenido de cobre), toneladas de concentrado producido y procesado (y cobre contenido), toneladas de ánodos producidos y procesados, y toneladas de cátodos ER y EO producidos.

## **2.3 Cálculos**

Para realizar los cálculos se aplica, con algunos refinamientos muy menores, la metodología desarrollada en el año 2002 por el Programa de Investigaciones en Energía (PRIEN), destinada a evaluar las emisiones de GEI y realizar un Inventario de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero para CODELCO-Chile en el contexto de la iniciativa del World Resources Institute / World Business Council for Sustainable Development (WRI / WBCSD), la que se encuentra extensamente desarrollada en el anterior estudio de COCHILCO<sup>9</sup>.

### **2.3.1 Uso de Energía**

Los tipos de combustibles usados por las operaciones mineras en Chile son: petróleo combustible, diesel, gasolina, kerosene, nafta, carbón, gas licuado y gas natural.

Para calcular la energía asociada al combustible consumido se utilizaron los poderes caloríficos inferiores. Para todos los combustibles se consideró que el poder calorífico inferior era el 95% del valor del poder calorífico superior<sup>10</sup>, excepto para el gas licuado y el gas natural, en que se utilizó un 90%<sup>11</sup>. Los valores de energía están expresados en múltiplos de Joule.

El consumo de energía eléctrica, que se informó por procesos unitarios en cada operación minera, estaba expresado en Gigawatt-hora (GWh) consumidos anualmente por cada subproceso (chancado, molienda, flotación, hornos...etc.). Estos datos se agregaron para cada uno de los principales procesos unitarios. En este trabajo los datos de energía eléctrica también se informan en múltiplos de Joule.

Todas las faenas de la minería del cobre consumen energía eléctrica para servicios generales y algunas tienen pérdidas por transmisión interna, las que se informan para toda la operación. Este consumo se distribuyó entre los procesos unitarios definidos en proporción a la fracción del consumo total de energía eléctrica (menos servicios y pérdidas) que correspondía a

---

<sup>9</sup> "Emisiones de Gases de Efecto Invernadero de la Minería del Cobre de Chile. 1995-2006". [www.cochilco.cl](http://www.cochilco.cl)

<sup>10</sup> Balance Nacional de Energía, Comisión Nacional de Energía – Chile.

<sup>11</sup> Supuestos de la International Energy Agency.

cada proceso. Por lo tanto, las emisiones indirectas de GEI asociadas a servicios y pérdidas de transmisión se asignaron también en la misma proporción.

Finalmente, otro consumo indirecto de energía asociado a las operaciones mineras es la energía gastada en la producción, procesamiento y transporte del petróleo y gas usado por estas operaciones. Esto se calculó como lo indica la metodología, utilizando la información de la Comisión Nacional de Energía. Este valor de energía se agregó a la energía asociada al uso de energía eléctrica y se informa como Uso Indirecto de Energía.

### **2.3.2 Emisiones Directas**

Para calcular las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas al consumo de cada tipo de combustible, se usó el correspondiente factor de emisión del combustible y la fracción de carbono oxidado, datos que están publicados en "Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Workbook (Volume 2)".

Para calcular las emisiones de CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O asociadas al uso directo de cada tipo de combustible, se utilizaron los factores de emisión publicados por el IPCC, que son función del combustible y del tipo de uso que se le ha dado al combustible. A pesar que las emisiones de CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O son menores que las emisiones de CO<sub>2</sub>, su potencial de calentamiento global por unidad de masa es mayor. Así, en el caso del metano el potencial de calentamiento global por unidad de masa es 21 veces mayor que en el caso del CO<sub>2</sub> y en el caso del N<sub>2</sub>O es 310 veces mayor, por lo que para expresarlas como emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente, se multiplican por estos factores.

### **2.3.3 Emisiones Indirectas – Consumo de Combustibles**

Además, hay emisiones de GEI, principalmente CH<sub>4</sub>, asociadas a las actividades de la industria del petróleo y gas, que son las que producen los combustibles usados por la minería: producción, procesamiento, transporte y uso, así como venteo de gas natural<sup>12</sup>. Estas emisiones pueden asignarse a las operaciones mineras como emisiones indirectas. Por la misma razón, se puede estimar un uso indirecto de energía asociado también a la producción y procesamiento de los combustibles requeridos por la operación minera.

---

<sup>12</sup> Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Reference Manual (Volume 3), Page 1.1.

En este estudio el factor de emisión del gas natural no incluye las emisiones del procesamiento y venteo, ya que en el período la minería del cobre no consumió el gas natural producido en Chile.

#### **2.3.4 Emisiones Indirectas – Abastecimiento de Energía Eléctrica**

Las faenas mineras, según su ubicación geográfica, obtienen su abastecimiento de energía de alguno de los dos principales sistemas energéticos del país, el Sistema Interconectado del Norte Grande (SING) y el Sistema Interconectado Central (SIC). La configuración de estos sistemas, así como los parámetros operacionales requeridos para calcular las emisiones asociadas de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, y N<sub>2</sub>O del período 2001-2007 se obtuvieron de los sitios web de la Comisión Nacional de Energía ([www.cne.cl](http://www.cne.cl)) y del Centro de Despacho Económico de Carga ([www.cdec.cl](http://www.cdec.cl)), tanto para el SING como para el SIC.

#### **2.3.5 Demanda Unitaria de Energía y Carga Unitaria de Emisión**

La Demanda Unitaria de Energía (DUE) se define como la energía usada, directa o indirectamente, a través de todo el proceso para producir una tonelada métrica de cobre fino en cualquiera de sus formas. La DUE puede ser directa (energía de combustibles fósiles consumidos directamente en la operación), indirecta (energía eléctrica abastecida por una tercera parte) o total (la suma de las DUEs directa e indirecta)

Asimismo, la Carga Unitaria de Emisión (CUE) se define como la cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente asociada a la producción de una tonelada métrica de cobre fino, y se calcula en la misma forma que la DUE, pero reemplazando el término energía por un término de emisión. También la CUE puede ser calificada de directa (asociada a la combustión de combustibles fósiles en la operación minera), indirecta (generada por la producción de la energía eléctrica utilizada por los procesos y por la producción de los combustibles fósiles) o total (la suma de las CUEs directas e indirectas).

#### **2.3.6 Concentrados y Ánodos de Cobre de Fuentes Externas**

Las fundiciones y refinerías también procesan materiales provenientes de fuentes externas. Esta alimentación, que es variable en cantidades y orígenes, introduce una complejidad adicional a este análisis.

Para abordar el tema de la alimentación proveniente de fuentes externas, las empresas proporcionaron los antecedentes de sus respectivas faenas.

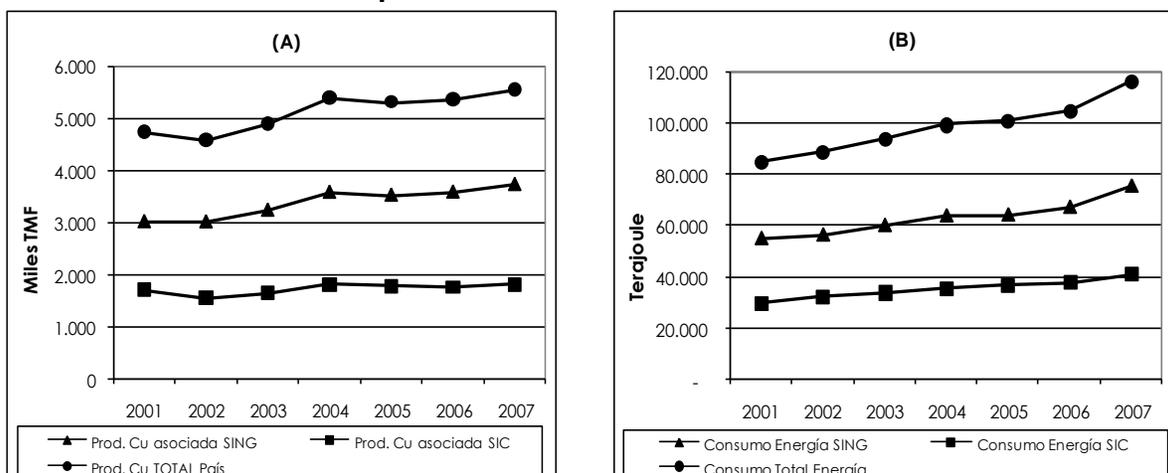
Es importante destacar que, como se señaló anteriormente, este estudio utiliza la información proporcionada por 38 faenas mineras, principalmente de la Gran y Mediana Minería, por lo que, en aquellos casos en que parte de la alimentación a una fundición provenía de una faena de la pequeña minería se utilizó la mejor información disponible.

### III ANALISIS DE RESULTADOS

#### 3.1 Producción, Uso Global de Energía y Emisiones de GEI

La Figura N°1(A) muestra las cifras anuales de producción de cobre asociada al SING y al SIC, así como la producción total de Chile para los años que cubre el estudio, expresadas en miles de toneladas métricas de cobre fino. El país incrementó su producción anual de 4,74 a 5,56 millones de toneladas de cobre fino en el período, que significa un crecimiento de 17,3% entre los años 2001 y 2007. La producción de cobre asociada al SING aumentó en un 23,5%, mientras que la asociada al SIC sólo lo hizo en un 6,2%.

**Figura N° 1**  
**Producción de Cobre y Consumo Total de Energía**  
**por Sistema de Generación**



**Fuente:** Elaborado por la Comisión Chilena del Cobre en base a información de las empresas

Como se muestra en la Figura N°1(B), el consumo de energía en los primeros 4 años del período en análisis presenta una tendencia similar a la de la producción de cobre, sin embargo, en los últimos 3 años se incrementa en mayor proporción que la producción. En las faenas asociadas al SING el consumo de energía creció, entre 2001 y 2007 en un 36,8%, valor que es superior al incremento de producción de cobre (23,5%). En el SIC, el consumo energético aumentó también en un 36,8%, mientras la producción lo hacía en sólo un 6,2%. El consumo total creció en 36,8%, valor que es superior al aumento de producción de cobre del país (17,3%). En términos generales, sin considerar la cartera de productos comerciales, las faenas productoras de cobre del país estarían experimentando en esta década un incremento en la intensidad de uso de energía (energía consumida por unidad de cobre fino producido), ya que entre los años

2004 y 2007 la producción se incrementó en 2,7% y el consumo de energía aumentó en 17%. Este mayor consumo energético puede explicarse principalmente por los importantes aumentos en el período de los consumos unitarios de energía en las áreas mina, concentradora y tratamiento de minerales lixiviables.

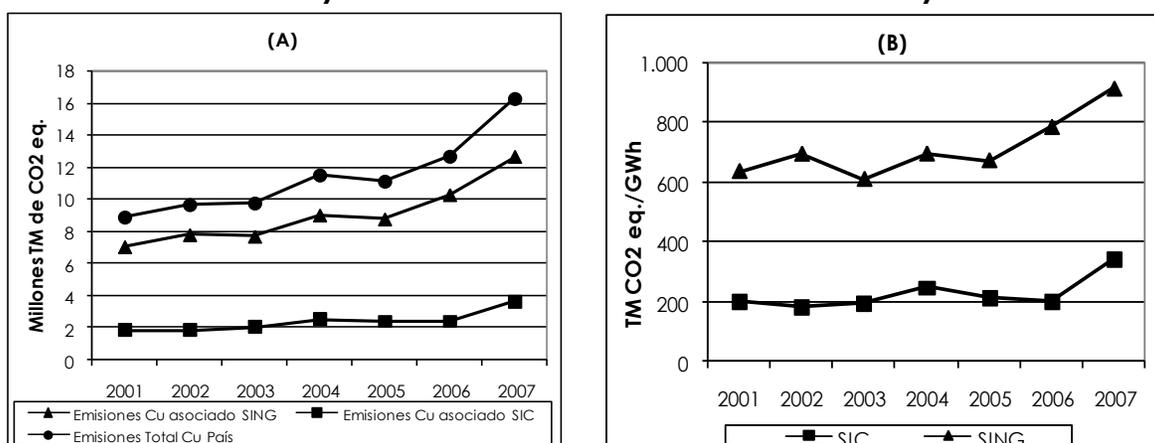
**Tabla N° 1**  
**Consumo Total de Energía y Participación de Energía Directa**

	Consumo Anual de Energía (TJ)						
	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
<b>SING</b>	55.244	56.622	60.303	64.038	64.400	67.370	75.562
<b>SIC</b>	29.862	32.171	33.858	35.451	36.648	37.766	40.841
<b>TOTAL</b>	85.105	88.794	94.161	99.488	101.048	105.136	116.403
	% Energía Directa						
	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
<b>SING</b>	49,4	48,4	46,4	46,2	46,4	47,4	49,6
<b>SIC</b>	41,7	38,2	38,5	36,0	36,2	36,5	36,6
<b>TOTAL</b>	46,7	44,7	43,5	42,5	42,7	43,5	45,0

**Fuente:** Elaborado por la Comisión Chilena del Cobre en base a información de las empresas.

En el año 2007 la minería del cobre que se abastece de energía eléctrica del SING produjo el 67,4% del cobre del país en sus distintas formas comerciales y consumió el 64,9% del total de la energía consumida por el sector. La fracción de la energía total consumida por la minería del cobre que corresponde a uso de energía directa disminuyó de 46,7% en el año 2001 a 45,0% en el 2007.

**Figura N° 2**  
**Emisiones de GEI de la Minería del Cobre según Sistema de Generación Eléctrica y Perfil de Emisiones Unitarias del SING y SIC**



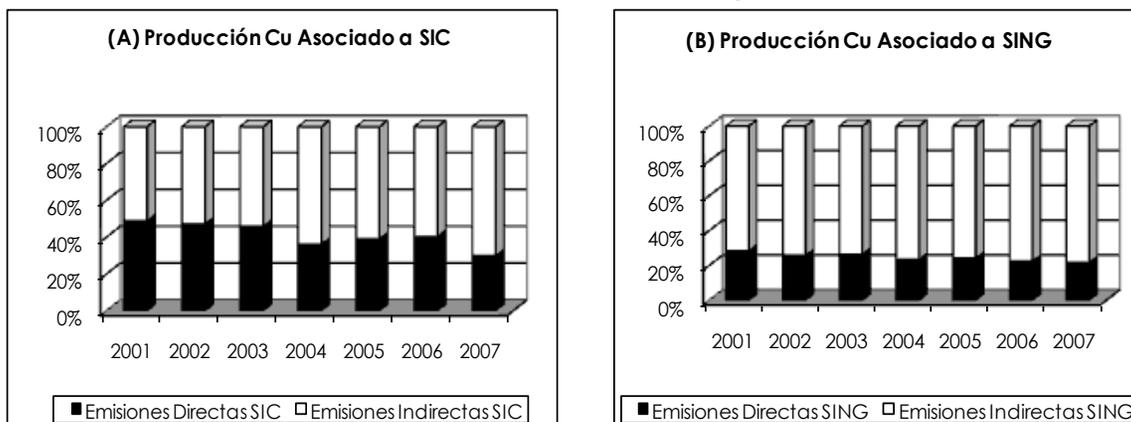
**Fuente:** Elaborado por la Comisión Chilena del Cobre en base a información de las empresas, la CNE y el CDEC.

En lo que dice relación con las emisiones de GEI del sector minería del cobre, la Figura N°2(A) muestra las emisiones anuales de CO<sub>2</sub> equivalente de la producción de cobre asociada a cada uno de los sistemas de generación eléctrica. Entre 2001 y 2007 las emisiones asociadas al SIC se incrementan en 97,2%, mientras que, como se ha señalado, la producción de cobre que se abastece de ese sistema aumenta sólo un 6,2%. Por su parte, las emisiones asociadas al SING crecen en un 79,3%, mientras que la respectiva producción se incrementa en un 23,5%. Las emisiones totales del sector en el año 2007 alcanzaron a 16,26 millones de TM CO<sub>2</sub> equivalente, lo que representa un incremento de 29% respecto del año 2006.

Lo anterior se debe, por una parte, al aumento en la intensidad de uso de energía que ha experimentado el sector en el período, y por otra, a un factor que es el más relevante, los cambios en las matrices energéticas de los sistemas de generación eléctrica debido a los problemas de abastecimiento de gas natural (ver Figura N°2(B)). Entre 2001 y 2007 los coeficientes unitarios de emisión del SIC aumentan en un 68%, influidos principalmente por el crecimiento en la generación térmica del SIC, que pasa de 31,6% en 2001 a 47,1% en el 2007, y por el reemplazo del gas natural por diesel y carbón, que tienen factores de emisión más elevados. Por su parte el SING, también aumenta sus coeficientes unitarios en un 43,7%, producto de cambios en los combustibles utilizados. En el año 2001 el principal combustible era gas natural (55,8%), mientras que en el 2007 las centrales generadoras utilizaron principalmente carbón (57,6%) y diesel (16,4%), producto de los problemas de abastecimiento de gas natural, que han significado cambios en los combustibles utilizados por las centrales generadoras.

El SING tiene un factor de emisión unitario de GEI más alto que el del SIC, debido a que en su configuración de plantas de energía prácticamente el 100% corresponde a generación térmica. Los perfiles de la Figura N°2(B) indican algunas importantes características de relevancia para este estudio. El SING emite entre 2,7 y 3,8 veces más toneladas de CO<sub>2</sub> por GWh generado que el SIC. Por otra parte, ambos sistemas experimentaron un fuerte incremento de sus emisiones de CO<sub>2</sub> por GWh principalmente en el año 2007, aumentando en este último año en un 70% las emisiones unitarias del SIC y en 17% las del SING. Obviamente, estas características juegan un importante rol en la determinación de los perfiles de emisión de las operaciones y productos de la minería del cobre que se analizan en este trabajo.

**Figura N° 3**  
**Participación Emisiones Directas e Indirectas según Sistema de Generación**



**Fuente:** Elaborado por la Comisión Chilena del Cobre en base a información de las empresas.

En la Figura N°3(A) se puede observar que, para la producción de cobre asociada al SIC las emisiones directas (uso de combustibles fósiles directamente en el proceso) disminuyen en el período de un 49% a un 30%, mientras las indirectas (producto del consumo de energía eléctrica abastecida por el SIC) se incrementan de un 51% a un 70%. Lo anterior se explica básicamente por cambios tecnológicos, principalmente en las fundiciones. Estas, por razones ambientales, dejaron de utilizar los hornos reverbero y en la actualidad usan hornos cuyo funcionamiento es autógeno (Convertidor Teniente, Convertidor Noranda y Horno Flash Outokumpu), lo que involucra una reducción en el uso directo de combustibles, con la consiguiente reducción de emisiones. Además, se instalaron hornos eléctricos para el tratamiento de las escorias y sistemas de captación y tratamiento de gases, que aumentan el consumo de energía eléctrica, lo que unido a un incremento en los coeficientes unitarios de emisión del SIC explican el incremento de las emisiones indirectas.

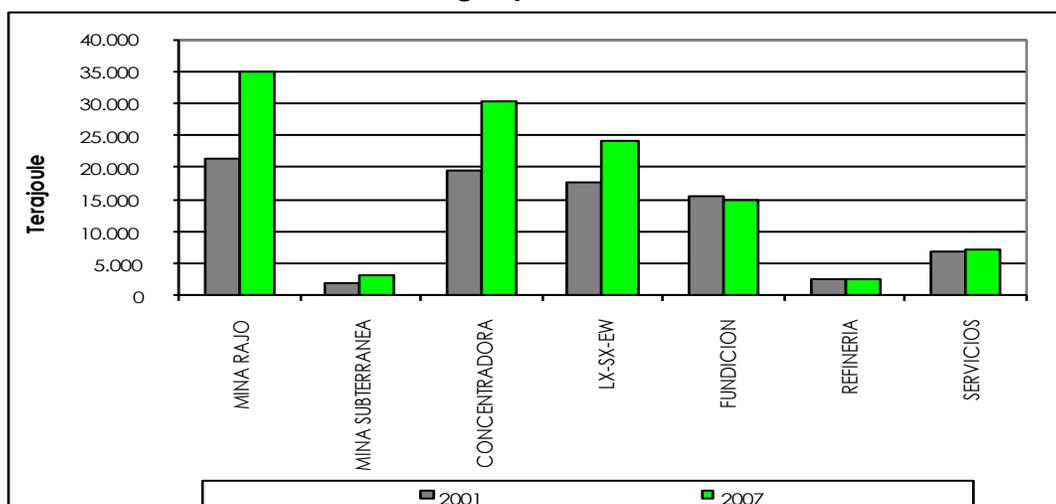
Por su parte, en el período, la proporción de las emisiones generadas por la producción de cobre asociada al SING (Figura N°3(B)) se mantiene relativamente estable, las directas bajan de 28% a 22%, mientras las indirectas suben de 72% a 78%, influenciadas por las mayores emisiones de GEI asociadas al SING.

## 3.2 Uso de Energía y Emisiones de GEI por Áreas de Producción

### 3.2.1 Consumo de Energía

En la Figura N° 4 se muestra el consumo de energía en las distintas áreas de producción de cobre y su evolución en el período que abarca el estudio.

**Figura N° 4**  
**Consumo de Energía por Áreas de Producción**



**Fuente:** Elaborado por la Comisión Chilena del Cobre en base a información de las empresas.

En el año 2001 las minas rajo consumieron un 25% de la energía total, incrementando su participación en el año 2007 a 30%, lo que se explica fundamentalmente por la entrada en operación de algunos nuevos yacimientos, la profundización de las minas existentes, una reducción en las leyes del mineral y mayores distancias de acarreo de mineral y lastre. Por su parte, las minas subterráneas aumentan su participación de un 2,1% en 2001 a un 2,7% en el 2007.

La concentradora aumenta su participación en el consumo de energía de 23% a 26% en el 2007, lo que se debe a que hay un aumento de volumen del mineral procesado y un incremento de la dureza del mineral, con el consiguiente mayor gasto de energía en los procesos de chancado y molienda.

El área de tratamiento de minerales lixiviables (LX-SX-EW) mantiene una participación relativamente estable en el período en torno a 21%.

La fundición de concentrados de cobre continúa bajando su participación en el consumo total de energía del sector de 18% a 13% en el 2007,

producto de los cambios tecnológicos impulsados por medidas ambientales que se detallaron anteriormente.

La refinera electrolitica disminuye su participacion de un 3% a un 2%.

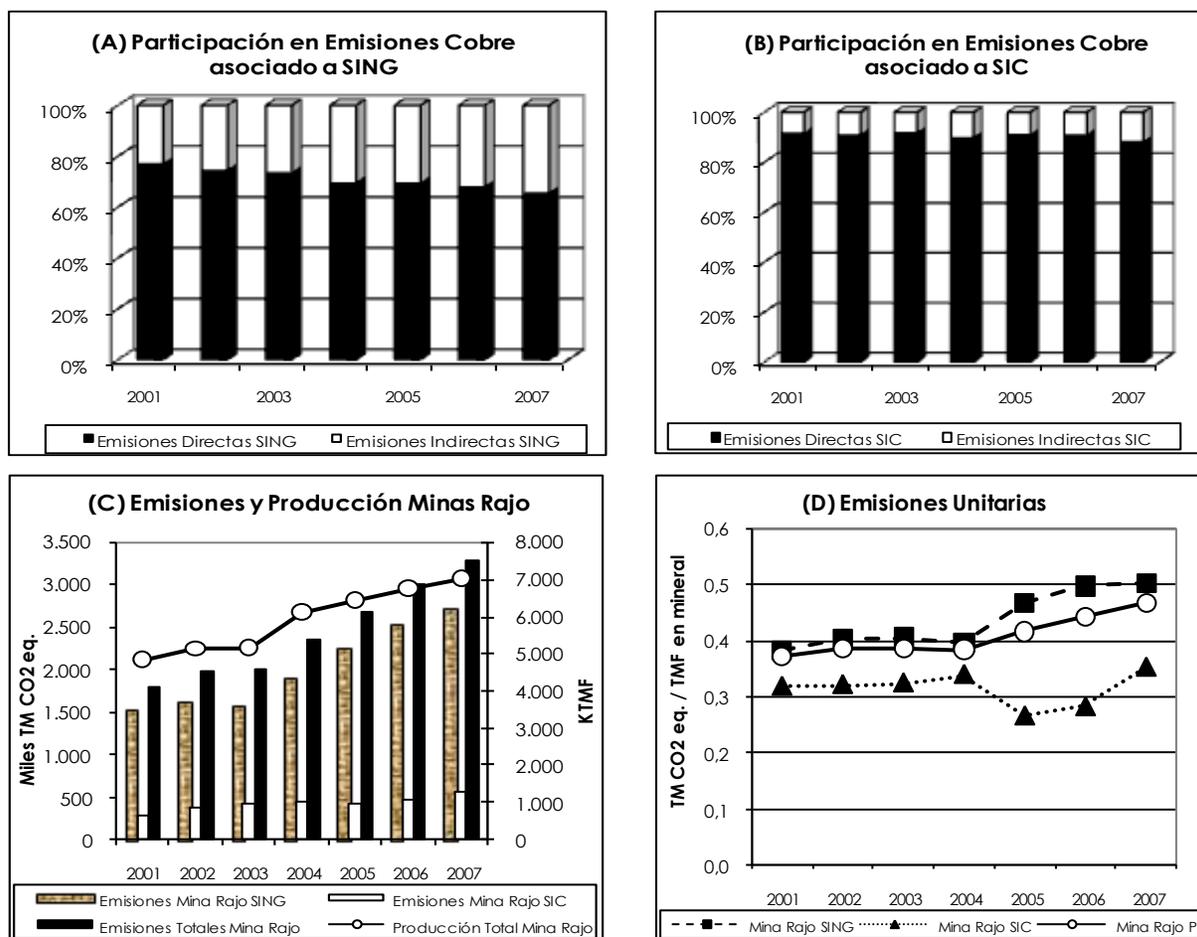
El area de servicios a la produccion baja su participacion en el consumo total de energia de 8% a 6% entre el 2001 y el 2007, debido principalmente a la tendencia creciente a externalizar este tipo de servicios.

### 3.2.2 Emisiones de GEI por Areas

#### 3.2.2.1 Area Mina Rajo

Las emisiones de GEI en el area mina rajo se incrementan en un 83% en el periodo, mientras la produccion de cobre fino de mina aumenta en 45%. Su participacion en las emisiones totales se mantiene en 20%.

**Figura N° 5**  
**AREA MINA RAJO**



**Fuente:** Elaborado por la Comisión Chilena del Cobre en base a información de las empresas.

Las emisiones totales de las minas rajo asociadas al SING (Figura N°5(C)) crecen entre 2001 y 2007 en un 80%, mientras la producción lo hace en un 38%. Las emisiones directas disminuyen su participación a un 66% (Figura N°5(A)), debido al incremento de las emisiones unitarias del sistema de generación.

Por su parte, las emisiones de las minas rajo asociadas al SIC (Figura N° 5(C)) se incrementan en el período en un 100%, mientras la producción de cobre fino de mina crece un 81%. La participación de las emisiones directas disminuye levemente desde un 92% en el año 2001 a un 88% en el 2007 (Figura N°5(B)).

En la Figura N°5(D) se observa que la Carga Unitaria de Emisión (CUE) de las minas rajo SING aumenta en un 31% entre el 2001 y 2007, mientras que la de las minas rajo del SIC lo hacen en un 11%. Debido a que la producción de cobre de mina rajo proviene mayoritariamente (77%) de minas asociadas al SING, los promedios ponderados país de la CUE para mina rajo siguen una tendencia similar a aquellas de las minas rajo SING, con un valor de CUE para el año 2007 de 0,47 TM CO<sub>2</sub> / TMF en mineral.

### **3.2.2.2 Área Mina Subterránea**

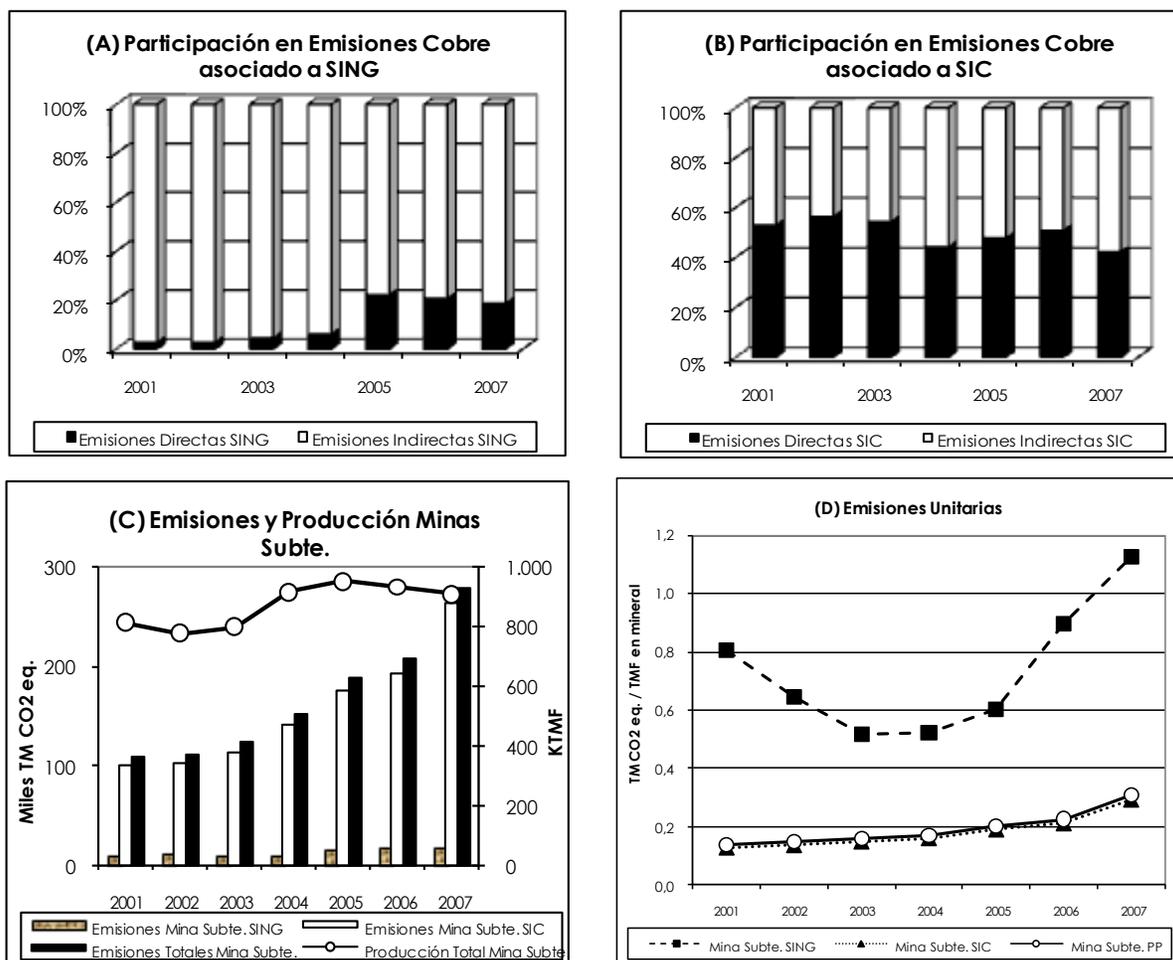
En el área mina subterránea las emisiones de GEI se incrementan en un 154% en el período y la producción de cobre fino crece sólo un 12%. Su participación en las emisiones totales se mantiene relativamente estable en el período en torno a 2%.

La producción de cobre de mina subterránea proviene mayoritariamente (98%) de minas asociadas al SIC.

Las emisiones totales de las minas subterráneas asociadas al SING (Figura N°6(C)) crecen en un 79% en el período, mientras la producción aumenta en un 28%. La participación de las emisiones directas en las emisiones totales del área mina subterránea del SING se incrementa en el período de un 3% a un 19%(Figura N°6(A)).

Por su parte, las emisiones de las minas subterráneas asociadas al SIC (Figura N°6(C)) se incrementan en el período en un 161%, mientras la producción de cobre fino de este tipo de mina en el SIC crece sólo un 12%. La participación de las emisiones directas se reduce de 53% a un 42% (Figura N°6(B)).

**Figura N° 6**  
**AREA MINA SUBTERRANEA**



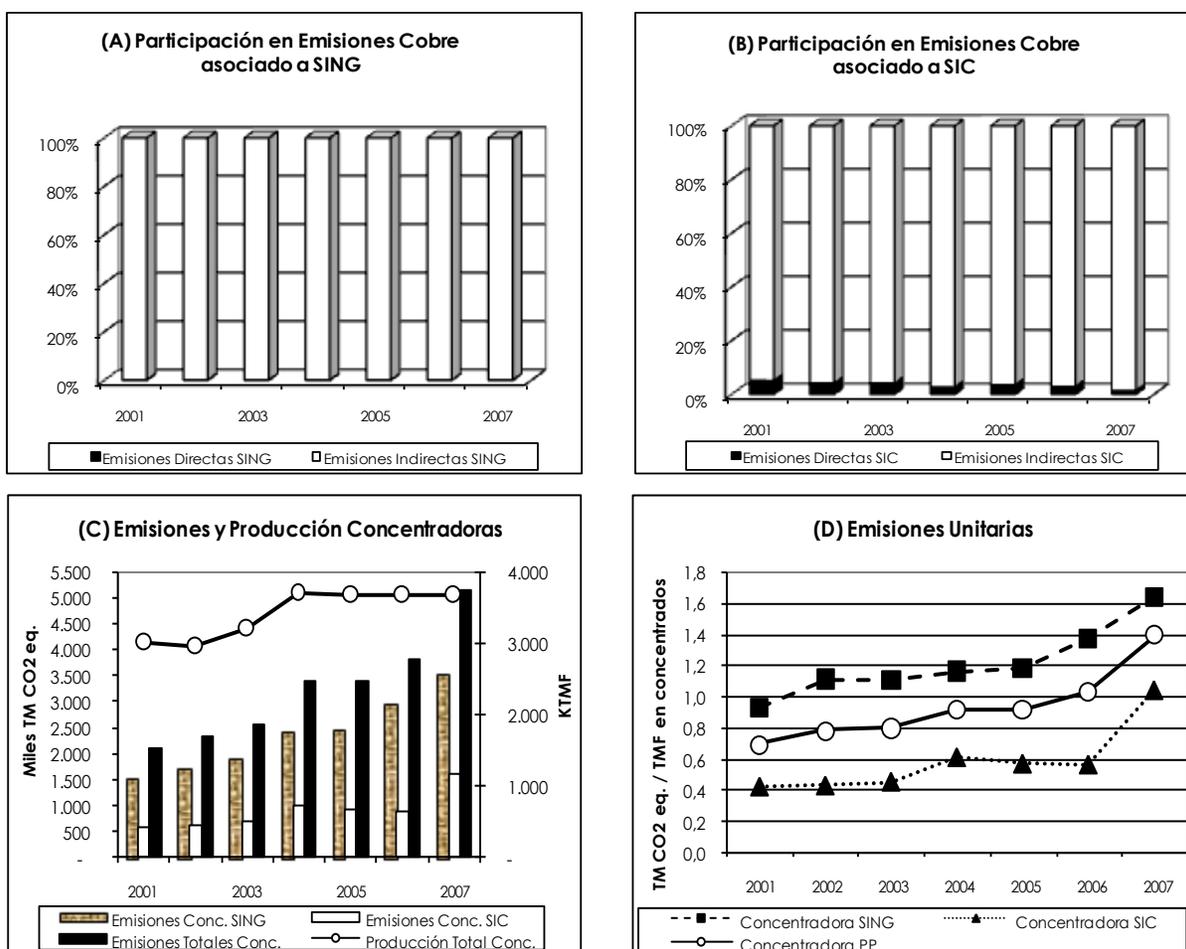
**Fuente:** Elaborado por la Comisión Chilena del Cobre en base a información de las empresas.

La Figura N°6(D) muestra que la Carga Unitaria de Emisión (CUE) de las minas subterráneas SING disminuye en los primeros 4 años del período, influenciada por los valores decrecientes de los coeficientes de emisión unitaria del sistema de generación, para luego incrementarse siguiendo la misma tendencia de dichos coeficientes unitarios. Los promedios ponderados país de la CUE para mina subterránea siguen la misma tendencia de aquellas de las minas subterráneas SIC, por la importancia de la producción de cobre proveniente de estas minas en el SIC, resultando un valor de CUE para el año 2007 de 0,31 TM CO<sub>2</sub> / TMF en mineral.

### 3.2.2.3 Área Concentradora

El área de concentración de minerales sulfurados de cobre consume principalmente energía eléctrica (chancado y molienda), por lo que sus emisiones están muy influidas por los coeficientes unitarios de emisión de los sistemas de generación eléctrica.

**Figura N° 7**  
**AREA CONCENTRADORA**



**Fuente:** Elaborado por la Comisión Chilena del Cobre en base a información de las empresas.

Las emisiones totales de GEI del área concentradora se incrementan en un 145% entre 2001 y el 2007, mientras que el cobre fino contenido en los concentrados producidos aumenta en 22% (Figura N°7(C)).

Las emisiones totales de las plantas concentradoras que se abastecen de energía eléctrica del SING aumentan en un 132%, mientras el volumen de cobre fino contenido en los concentrados producidos lo hace en un 31% (Figura N°7(C)). Las emisiones directas son irrelevantes, ya que las indirectas

constituyen el 99,8% de las emisiones durante todo el período (Figura N° 7(A)).

En el caso de las plantas concentradoras que se abastecen del SIC, las emisiones totales aumentan en 180% y el cobre fino contenido en los concentrados producidos se incrementa sólo en 12% (Figura N°7(C)). Las emisiones directas bajan en un 18%, en cambio las indirectas suben en 191%. Lo anterior se debe al aumento que experimentan en el período los coeficientes unitarios de emisión del SIC. Las emisiones directas disminuyen su participación en las emisiones totales de las plantas asociadas al SIC desde un 5% a un 2% (Figura N° 7(B)).

La Carga de Emisión (CUE) (Figura N°7(D)) de las concentradoras del SING aumenta en un 77% entre 2001 y 2007, mientras que la de las plantas asociadas al SIC aumenta en 150%, principalmente en el último año (86%). Los promedios ponderados país de la CUE para plantas concentradoras muestran una clara tendencia creciente en el período, alcanzando en el año 2007 un valor de 1,4 TM CO<sub>2</sub> / TMF en concentrado.

#### **3.2.2.4 Área Fundición**

El área de fundición de concentrados de cobre, con una producción que se mantiene relativamente estable en el período, con una ligera reducción el último año (6%), disminuye su participación en las emisiones totales de la minería del cobre desde un 15% en 2001 a un 11% en el 2007. Las emisiones del área se incrementan en un 33%, principalmente en los dos últimos años, debido a los aumentos experimentados por los coeficientes unitarios de emisión de los sistemas de generación eléctrica (Figura N°8(C)).

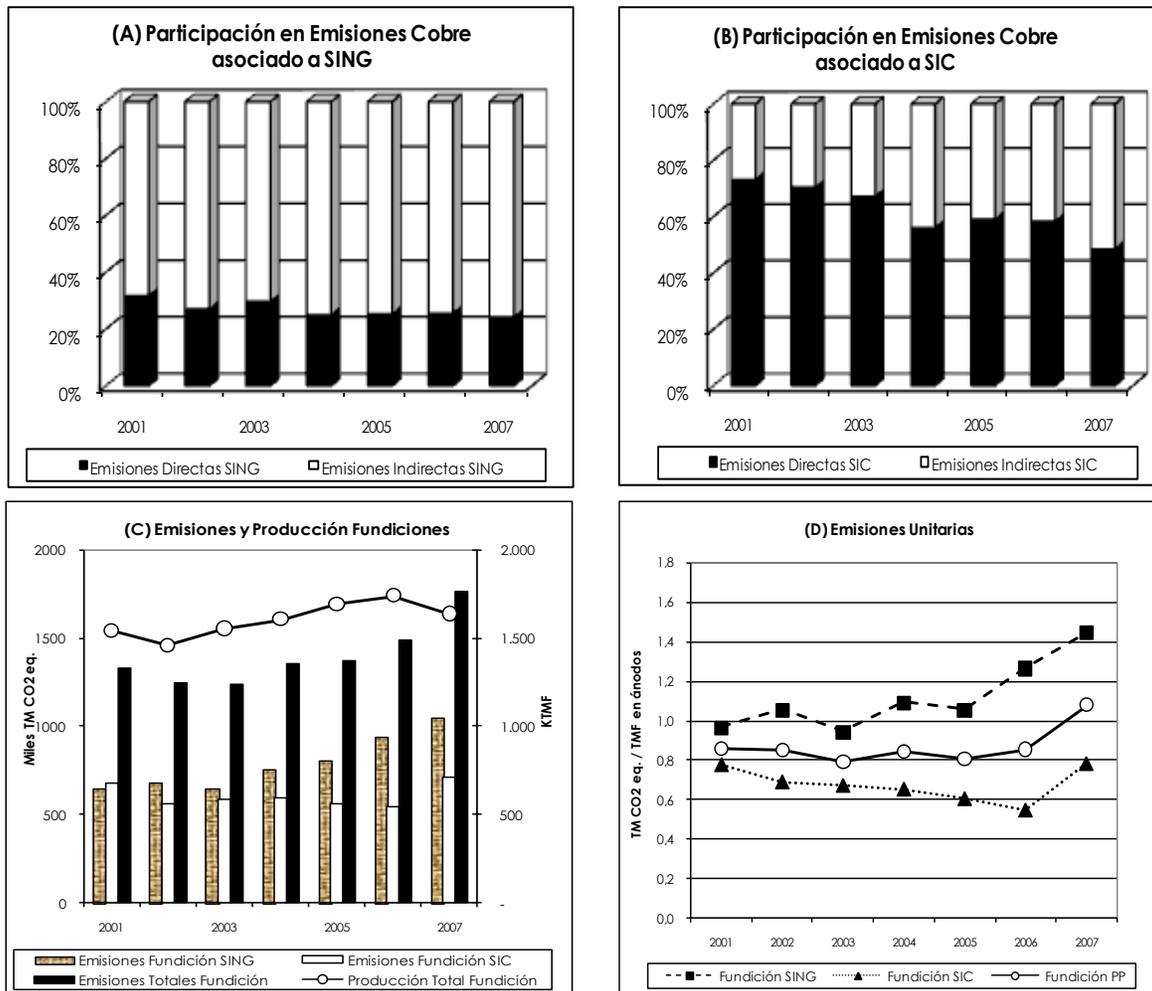
Las emisiones totales de las fundiciones asociadas al SING aumentan en un 63% en el período (Figura N°8(C)). Las emisiones indirectas de las fundiciones, que se producen por consumo de energía eléctrica del SING, aumentan su participación en las emisiones totales de las fundiciones abastecidas por este sistema desde un 68% a un 76% (Figura N°8(A)).

Las emisiones totales de las fundiciones del SIC aumentan en 5% (Figura N° 8(C)), y la participación de las emisiones directas disminuye de 73% a 49% en el período, lo que es un resultado del cambio tecnológico que han experimentado las fundiciones (Figura N°8(B)).

La Carga de Emisión (CUE) (Figura N°8(D)) de las fundiciones del SING aumenta en un 49% entre 2001 y 2007, y la de las fundiciones asociadas al SIC se incrementa en promedio un 1%, luego de experimentar una reducción de 30% en los primeros 6 años del período, lo que hace que los

promedios ponderados país de la CUE para las fundiciones crezcan en un 25%, alcanzando en el año 2007 un valor de 1,08 TM CO<sub>2</sub> equivalente / TMF en ánodos.

**Figura N° 8**  
**AREA FUNDICIÓN**



**Fuente:** Elaborado por la Comisión Chilena del Cobre en base a información de las empresas.

### 3.2.2.5 Área Refinería Electrolítica

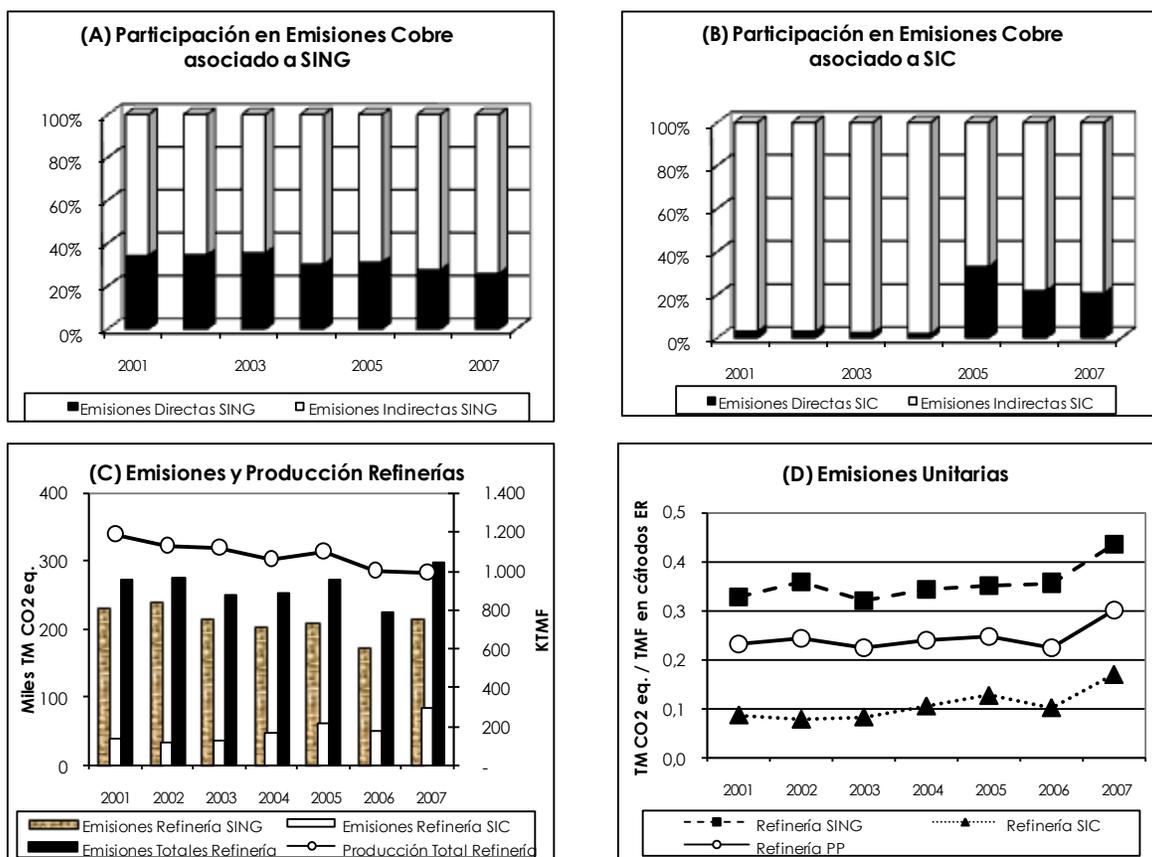
El área de refinación electrolítica, después del área mina subterránea, es la que muestra una menor participación en el total de emisiones de la minería del cobre (2% en el año 2007). Las emisiones de las refinerías electrolíticas del país se incrementan entre 2001 y el 2007 en un 9%, mientras la producción de cátodos electrorefinados (ER) disminuye un 16%, especialmente los últimos 2 años (Figura N°9(C)).

Las emisiones totales del área refinación electrolítica que recibe abastecimiento eléctrico del SING se reducen entre 2001 y 2007 en un 8% (Figura N°9(C)), producto fundamentalmente de una reducción en la producción (31%) en los 2 últimos años del período, que compensa el aumento de los coeficientes unitarios de emisión del sistema de generación.

En lo que se refiere a las emisiones totales de las refineras electrolíticas asociadas al SIC, mientras su producción se incrementa en un 5%, éstas aumentan sus emisiones en un 107%, impulsadas por los valores crecientes de los coeficientes unitarios de emisión del SIC (Figura N°9(C)).

Las emisiones directas del área refinera del SING disminuyen su participación de 34% a 26%, mientras que las del SIC la aumentan de 3% a 21% en el período (Figuras N°9(A) y (B)). En el año 2007 la refinación electrolítica en el SING contribuye con un 72% al total de emisiones del área.

**Figura N° 9**  
**AREA REFINERIA ELECTROLITICA**



**Fuente:** Elaborado por la Comisión Chilena del Cobre en base a información de las empresas.

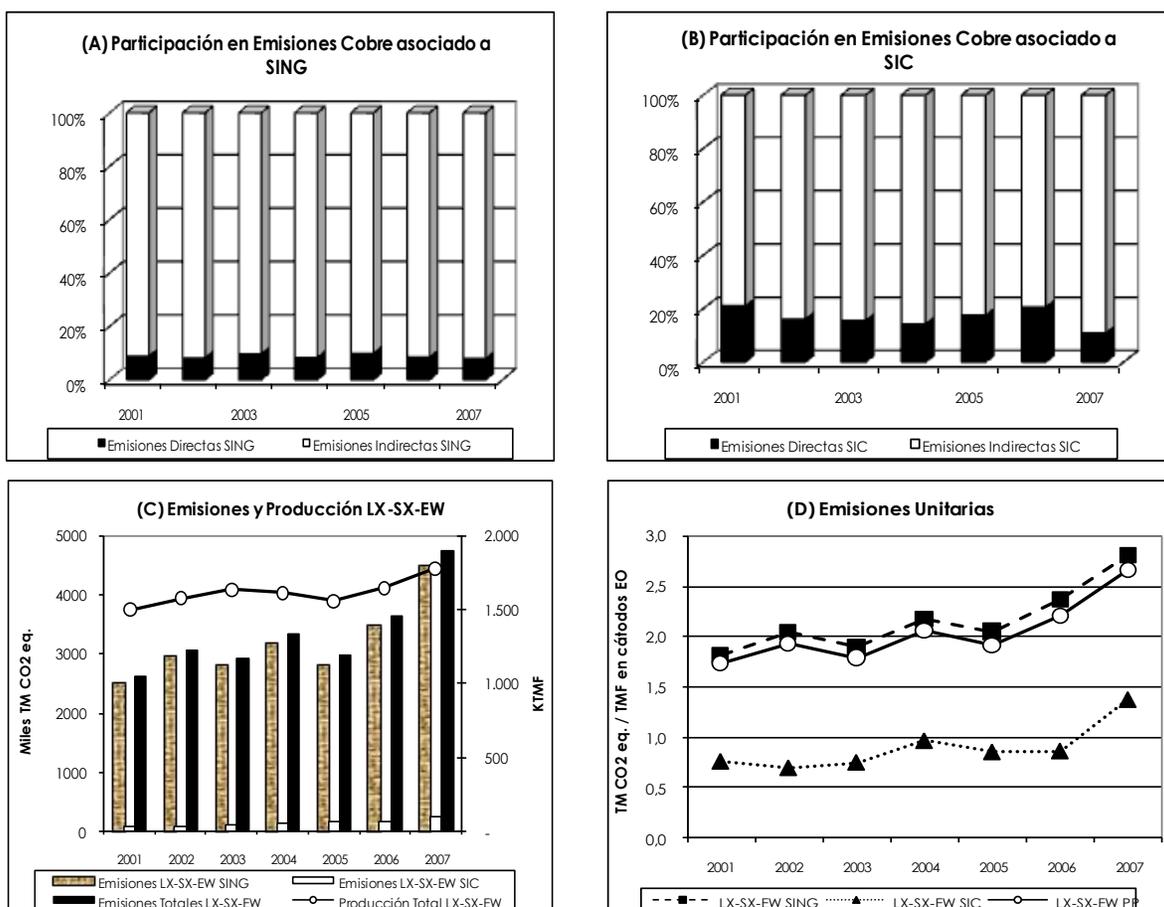
La Carga Unitaria de Emisión (CUE) (Figura N°9(D)) de la refinación electrolítica en el SING aumenta en un 33% entre 2001 y 2007, y la de las refinерías asociadas al SIC se incrementa en un 97%, lo que hace que los promedios ponderados país de la CUE para las refinерías alcancen en el año 2007 un valor de 0,30 TM CO<sub>2</sub> equivalente / TMF en cátodos ER.

### 3.2.2.6 Área Lixiviación – Extracción por Solvente – Electrodeposición

El área de tratamiento de minerales lixiviables aumenta sus emisiones en el período en un 82%, mientras la producción de cobre proveniente de este tipo de minerales aumenta entre 2001 y 2007 en un 19% (Figura N°10(C)).

Las emisiones totales de las faenas que reciben abastecimiento eléctrico del SING y que tratan este tipo de minerales aumentan en un 79%, mientras que las faenas asociadas al SIC incrementan sus emisiones en 171%.

**Figura N° 10**  
**AREA LX-SX EW**



**Fuente:** Elaborado por la Comisión Chilena del Cobre en base a información de las empresas.

El área de tratamiento de minerales lixiviables consume principalmente energía eléctrica, por lo que las emisiones directas representan un porcentaje menor en el total de emisiones. En el caso de las faenas asociadas al SING las emisiones directas fluctúan en torno al 10% y en las faenas que se abastecen del SIC éstas representan una fracción cercana al 17%, aunque en el último año muestran una reducción (Figura N°10 (A) y (B)). En el promedio ponderado país las emisiones indirectas se mantienen en el período en valores un poco superiores al 90%.

Es importante destacar que casi el 90% del cobre producido por lixiviación, extracción por solvente y electrodeposición proviene de faenas asociadas al SING. Por lo anterior, el aporte a las emisiones totales del área de las faenas SING fluctúa en el período entre un 95% y un 97%.

En la Figura N°10(D) se puede observar que la CUE promedio ponderado de las faenas asociadas al SIC muestra una tendencia creciente en el período (79%), al igual que la CUE de las operaciones que se abastecen del SING que aumenta en un 54%. En el año 2007 la CUE promedio ponderado país del área de tratamiento de minerales lixiviables alcanza un valor de 2,67 TM CO<sub>2</sub> equivalente / TMF en cátodos electroobtenidos (EO).

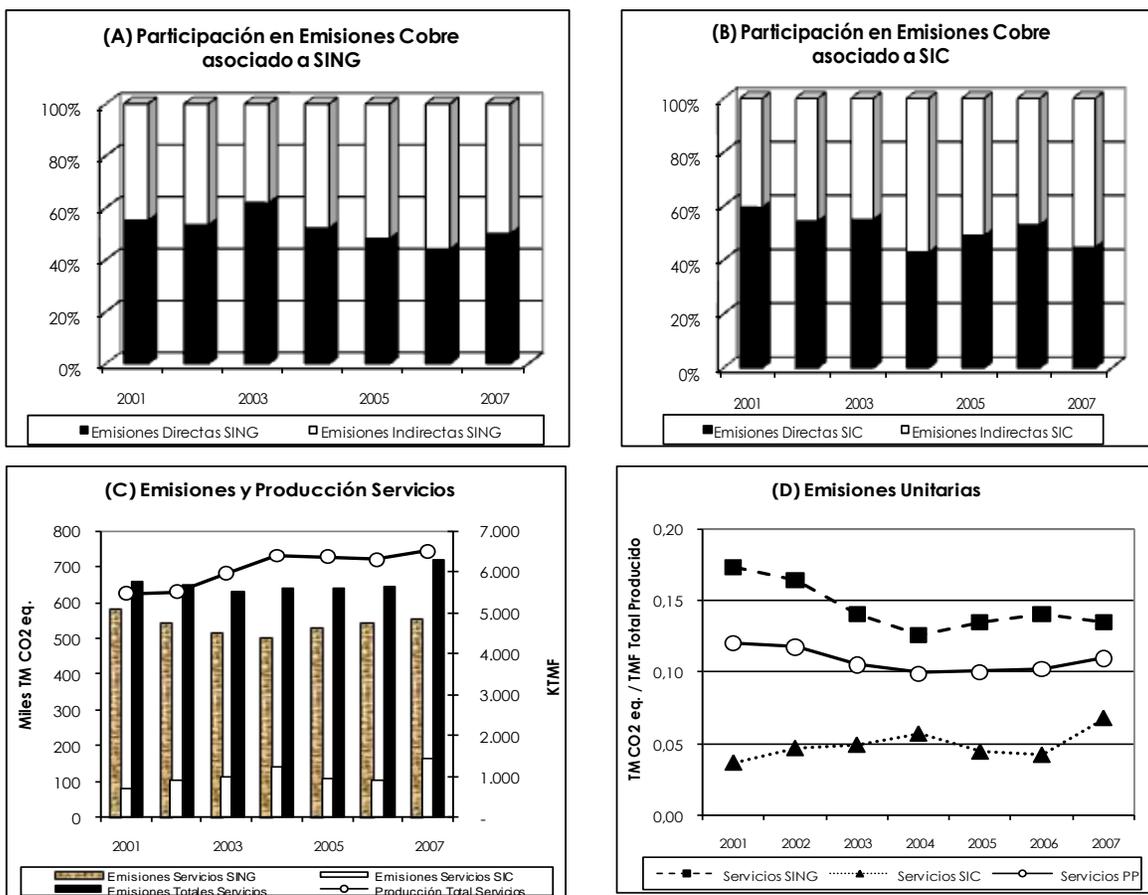
### **3.2.2.7 Área Servicios a la Producción**

El área de servicios a la producción disminuye su participación en el total de emisiones de la minería del cobre desde un 7% en el 2001 a un 4% en el 2007.

Las emisiones totales del área servicios de las faenas que se abastecen del SING se reducen en el período en un 4% (Figura N°11(C)), mientras en las faenas mineras que reciben abastecimiento eléctrico del SIC, las emisiones totales del área servicios a la producción se incrementan en un 108%.

La CUE del área servicios a la producción de las operaciones mineras asociadas al SING disminuye en un 22% en el período, mientras que la CUE de aquellas del SIC aumenta en un 85%. En el año 2007 la CUE del área servicios alcanza un valor promedio ponderado país de 0,11 TM CO<sub>2</sub> equivalente / TMF total producido (Figura N° 11(D)).

**Figura N° 11**  
**AREA SERVICIOS A LA PRODUCCION**



**Fuente:** Elaborado por la Comisión Chilena del Cobre en base a información de las empresas.

A continuación la siguiente tabla muestra la evolución de los valores de las cargas unitarias de emisión (CUE), por áreas de producción, para el período que abarca el estudio.

**Tabla N° 2**  
**Cargas Unitarias de Emisión por Áreas**

	<b>Unidades</b>	<b>2001</b>	<b>2002</b>	<b>2003</b>	<b>2004</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>
<b>Mina Rajo</b>	TM CO <sub>2</sub> eq. /TMF mineral	0,37	0,39	0,39	0,38	0,42	0,44	0,47
<b>Mina Subterránea</b>	TM CO <sub>2</sub> eq. /TMF mineral	0,14	0,14	0,15	0,17	0,20	0,22	0,31
<b>Concentradora</b>	TM CO <sub>2</sub> eq. /TMF concentrado	0,70	0,78	0,80	0,92	0,92	1,04	1,40
<b>Fundición</b>	TM CO <sub>2</sub> eq. /TMF ánodo	0,86	0,85	0,79	0,84	0,81	0,86	1,08
<b>Refinería</b>	TM CO <sub>2</sub> eq. /TMF cátodo ER	0,23	0,24	0,22	0,24	0,25	0,22	0,30
<b>LX-SX-EW</b>	TM CO <sub>2</sub> eq. /TMF cátodo EO	1,74	1,94	1,80	2,06	1,92	2,21	2,67
<b>Servicios</b>	TM CO <sub>2</sub> eq. /TMF total producido	0,12	0,12	0,11	0,10	0,10	0,10	0,11

**Fuente:** Elaborado por la Comisión Chilena del Cobre en base a información de las empresas.

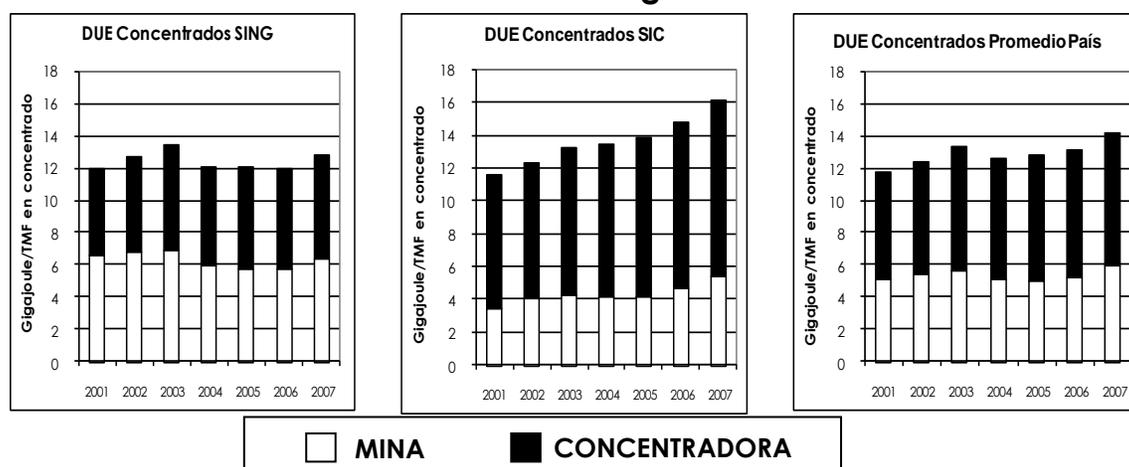
### 3.3 Demandas Unitarias de Energía y Cargas Unitarias de Emisión por Productos

Los valores de Demanda Unitaria de Energía (DUE) y Carga Unitaria de Emisión (CUE), calculados como se describe en el punto 2.3.5, estiman el consumo acumulado de energía y las emisiones de GEI generadas para producir una unidad de producto (1 tonelada de cobre fino contenido). A continuación, se indican para el período en estudio las DUEs y CUEs de los productos comerciales de la minería del cobre en Chile, diferenciando entre los dos sistemas de generación eléctrica (SIC y SING) y los valores resultantes para el promedio ponderado país, con una breve discusión respecto de lo que estos valores nos muestran respecto de la evolución de los diferentes procesos involucrados.

#### 3.3.1 Concentrados

La Figura N°12 muestra la evolución de los valores totales de DUE para este producto durante el período en estudio, como también las correspondientes contribuciones del área de mina y concentradora en cada caso. La mayor DUE es de 16,18 GJ/TMF para los concentrados producidos en el SIC el año 2007, y el menor valor es de 11,68 GJ/TMF para los concentrados del SIC en el año 2001. En el período, la DUE de los concentrados SIC muestra una clara tendencia creciente (39%), mientras que los concentrados del SING presentan algunas fluctuaciones, con un aumento de la DUE de 8%.

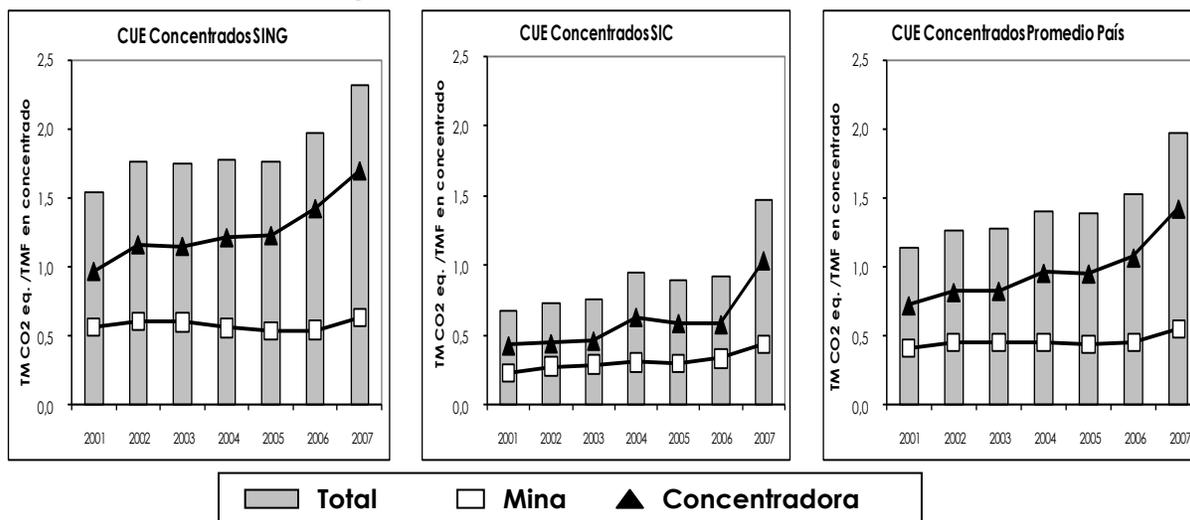
**Figura N° 12**  
**Demanda Unitaria de Energía Concentrados**



**Fuente:** Elaborado por la Comisión Chilena del Cobre en base a información de las empresas.

En el año 2007 la DUE promedio ponderado país de los concentrados alcanza un valor de 14,23 GigaJoule /TMF en concentrados que es un 21% superior al valor del año 2001.

**Figura N° 13**  
**Carga Unitaria de Emisión Concentrados**



**Fuente:** Elaborado por la Comisión Chilena del Cobre en base a información de las empresas.

En relación a la Carga Unitaria de Emisión (CUE) de los concentrados, cuya evolución se muestra en la Figura N°13, los valores más altos se observaron en los concentrados producidos por las operaciones mineras abastecidas por el SING, con un máximo de 2,33 TM de CO<sub>2</sub> equivalente por TMF en el año 2007. Lo anterior se debe a que los coeficientes unitarios de emisión del SING se incrementaron principalmente en los últimos 2 años por cambios en los combustibles utilizados por las centrales generadoras, lo que afecta particularmente las emisiones de las plantas concentradoras, cuyo consumo de energía es prácticamente 100% energía eléctrica (emisiones indirectas).

Las CUEs de los concentrados del SING fueron entre 1,6 y 2,4 veces más altas que las de los concentrados del SIC, debido a los coeficientes unitarios de emisión más altos del SING. El aporte de la concentradora a la CUE de los concentrados del SING aumenta de 63% a 73% en el 2007.

Las CUEs de los concentrados producidos con energía eléctrica del SIC se incrementan en un 120%, alcanzando en el año 2007 un valor de 1,47 TM de CO<sub>2</sub> equivalente por TMF. Esto se debe a que el perfil de emisiones unitarias del SIC experimenta un crecimiento de 68% en el período, por una reducción en la generación hidroeléctrica y un cambio de los

combustibles utilizados en la generación. Al igual que en los concentrados del SING, la contribución de la planta concentradora aumenta de 65% y 70%.

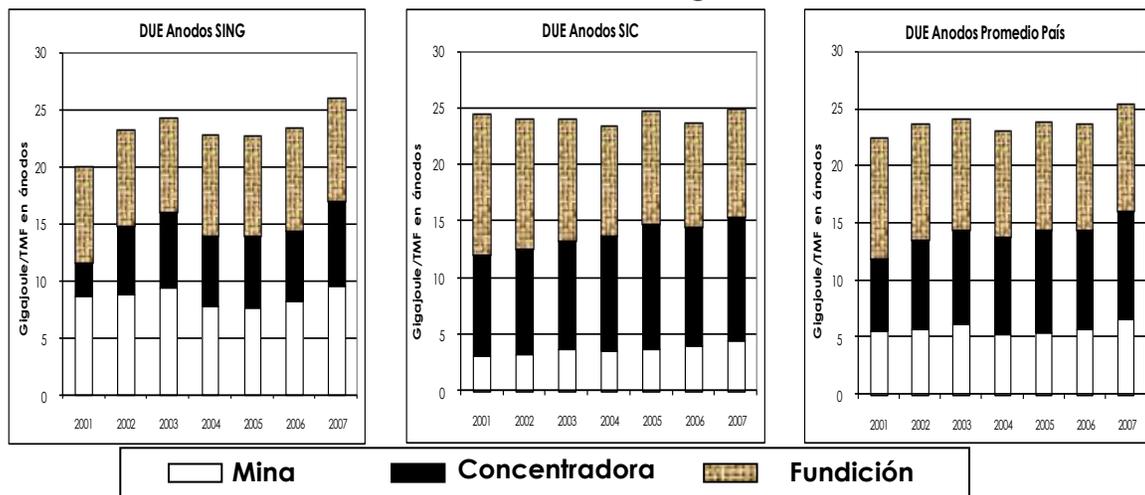
Las CUEs promedio ponderado del total de los concentrados producidos en el país muestran un incremento de 73% entre el año 2001 y el 2007, alcanzando este último año un valor de 1,97 TM de CO<sub>2</sub> equivalente por TMF en concentrados.

### 3.3.2 Ánodos

El cobre blister es el producto de la fundición que se moldea como ánodos para continuar su procesamiento en la refinería. Las siguientes figuras muestran las DUEs y CUEs de los ánodos producidos por las fundiciones de concentrados de cobre asociadas al SING y SIC. Los cálculos se realizaron utilizando la información entregada por las empresas respecto de la mezcla de concentrados alimentados a sus respectivas fundiciones en cada año considerado en el estudio. Cuando no se disponía de una información particular para un concentrado de la mediana o pequeña minería, se usó la mejor información disponible en el estudio.

En la Figura N°14 se muestran en forma separada las contribuciones de la mina, planta concentradora y la fundición a la Demanda Unitaria de Energía (DUE) de los ánodos.

**Figura N° 14**  
**Demanda Unitaria de Energía Ánodos**



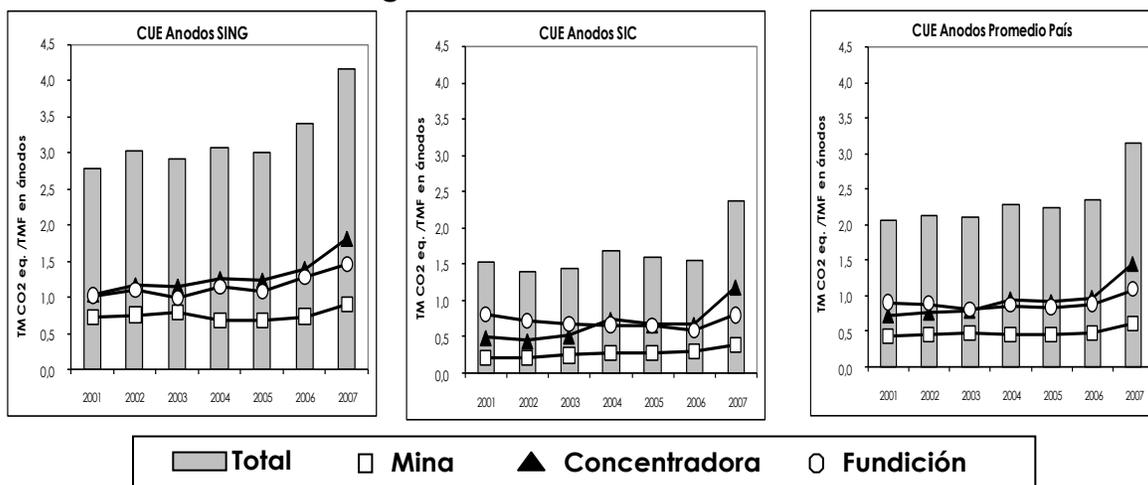
**Fuente:** Elaborado por la Comisión Chilena del Cobre en base a información de las empresas.

En el período, la tonelada de cobre fino en ánodos, tanto en los producidos en el SING, como aquellos producidos en el SIC, tiene un costo de energía que fluctúa entre 20 y 26 GJ / TMF en ánodos. Las DUEs de los ánodos SING aumentan en el período en un 30%, con un valor en el año 2007 de 26,1 GJ, mientras que las de los ánodos SIC se incrementan en un 2%, alcanzando el 2007 un valor de 24,9 GJ.

En el año 2007, la DUE de los ánodos promedio ponderado país tiene una contribución de 26% de la etapa mina, 37% de la concentradora y 36% de la fundición.

En relación con la CUE, cuya evolución se muestra en la Figura N° 15, nuevamente los valores fueron entre 1,8 y 2,2 veces más altos en los ánodos que reciben abastecimiento eléctrico del SING que aquellos del SIC.

**Figura N° 15**  
**Carga Unitaria de Emisión Ánodos**



**Fuente:** Elaborado por la Comisión Chilena del Cobre en base a información de la empresa

La CUE de los ánodos del SING sube un 50% en el período, llegando a un valor de 4,17 TM de CO<sub>2</sub> equivalente por TMF en ánodos en el año 2007. Por su parte, la CUE de los ánodos SIC aumenta entre 2001 y 2007 en un 56%, para alcanzar el año 2007 un valor de 2,38 TM de CO<sub>2</sub> equivalente por TMF en ánodos.

La CUE promedio ponderado de los ánodos producidos en el país aumenta en un 52%, fundamentalmente por el aumento de las emisiones en el área mina y concentradora, alcanzando en el año 2007 un valor de 3,16 TM de CO<sub>2</sub> equivalente por TMF en ánodos.

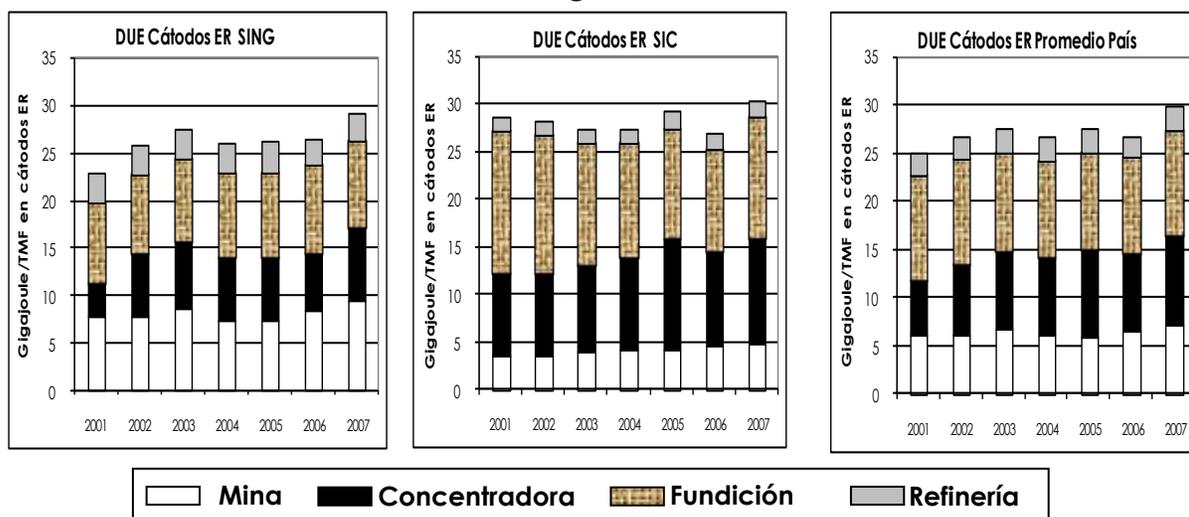
Es importante destacar que, a partir de la producción de ánodos ya no se puede hablar de “ánodos SING o SIC puros”, ya que las fundiciones procesan concentrados de distintas partes del país y por lo tanto, la CUE de éstos puede estar asociada a la generación eléctrica del SING o del SIC.

### 3.3.3 Cátodos ER

La Figura N°16 muestran los valores de las DUEs para los cátodos electrorefinados (ER) producidos en el país, según el sistema de generación eléctrica que abastece a las respectivas refinerías electrolíticas.

La DUE de los cátodos ER producidos con energía eléctrica del SING aumenta entre el año 2001 y el 2007 en un 28%, llegando este último año a un valor de 29,3 GigaJoule / TMF en cátodos ER.

**Figura N° 16**  
**Demanda Unitaria de Energía Cátodos Electrorefinados**



**Fuente:** Elaborado por la Comisión Chilena del Cobre en base a información de las empresas.

Los cátodos ER producidos con energía eléctrica generada por el SIC muestran DUEs que disminuyen sostenidamente en el período (6%) para subir bruscamente en el año 2007, alcanzando un valor de 30,5 GigaJoule / TMF en cátodos ER.

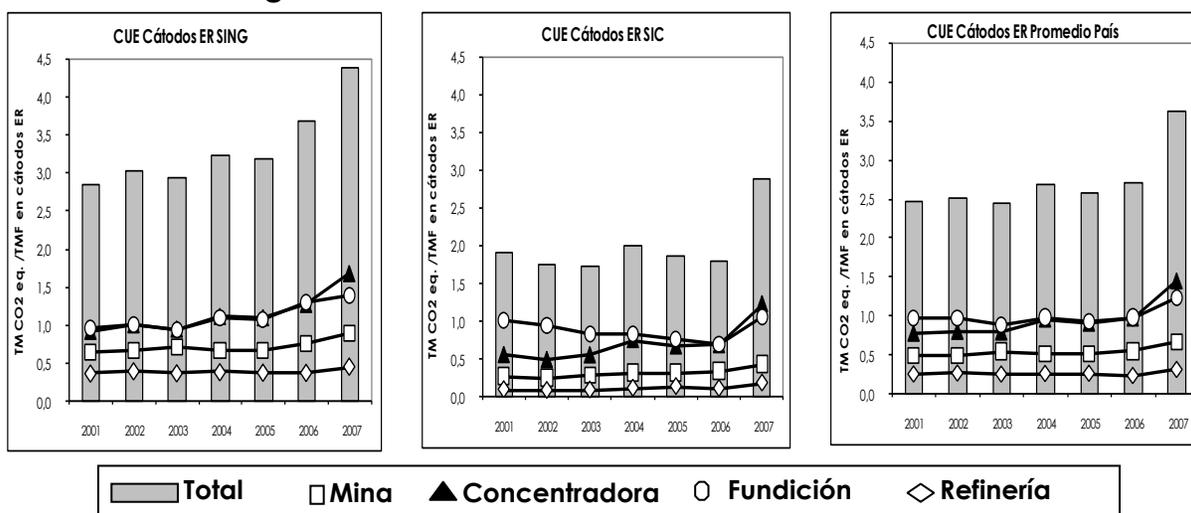
Las DUEs promedio ponderado de los cátodos ER producidos en Chile muestran una tendencia creciente en el período (19%), llegando a 29,9 GigaJoule / TMF en cátodos ER.

Las contribuciones a la DUE de la mina y la refinería, con algunas fluctuaciones, se mantienen bastante estables en el período, con valores

de alrededor de 24% y 9% respectivamente. El área concentradora aumenta su participación de 22% a 32%, mientras la fundición reduce su contribución de 44% a 36%.

Las cargas de emisión que genera la producción de 1 tonelada de cobre fino en cátodos ER (CUEs) se muestran a continuación en la Figura N°17. Al igual que en el caso de los ánodos, no hay un “cátodo ER puro” asociado al SING o al SIC, porque las refinерías se alimentan de una mezcla de ánodos que provienen de las distintas fundiciones del país. A esto se agrega el efecto, tal como se indicó anteriormente, de que los ánodos se produjeron también con una mezcla de concentrados cuyo origen está asociado a las dos matrices energéticas identificadas.

**Figura N° 17**  
**Carga Unitaria de Emisión Cátodos Electrorefinados**



**Fuente:** Elaborado por la Comisión Chilena del Cobre en base a información de las empresas.

La CUE de los cátodos ER del SING aumenta en el período un 54%, llegando en el año 2007 a un valor de 4,4 TM de CO<sub>2</sub> equivalente por TMF en cátodos ER. El incremento del valor de la CUE, principalmente en los últimos 2 años, se debe fundamentalmente al aumento de las emisiones unitarias del SING por cambio en los combustibles utilizados por las centrales generadoras producto del déficit de gas (gas natural a carbón y diesel).

La CUE de los cátodos ER del SIC crece en un 51%, impulsada por los valores crecientes de los coeficientes unitarios de emisión del SIC. En el año 2007 se tiene un valor de 2,9 TM de CO<sub>2</sub> equivalente por TMF en cátodos ER.

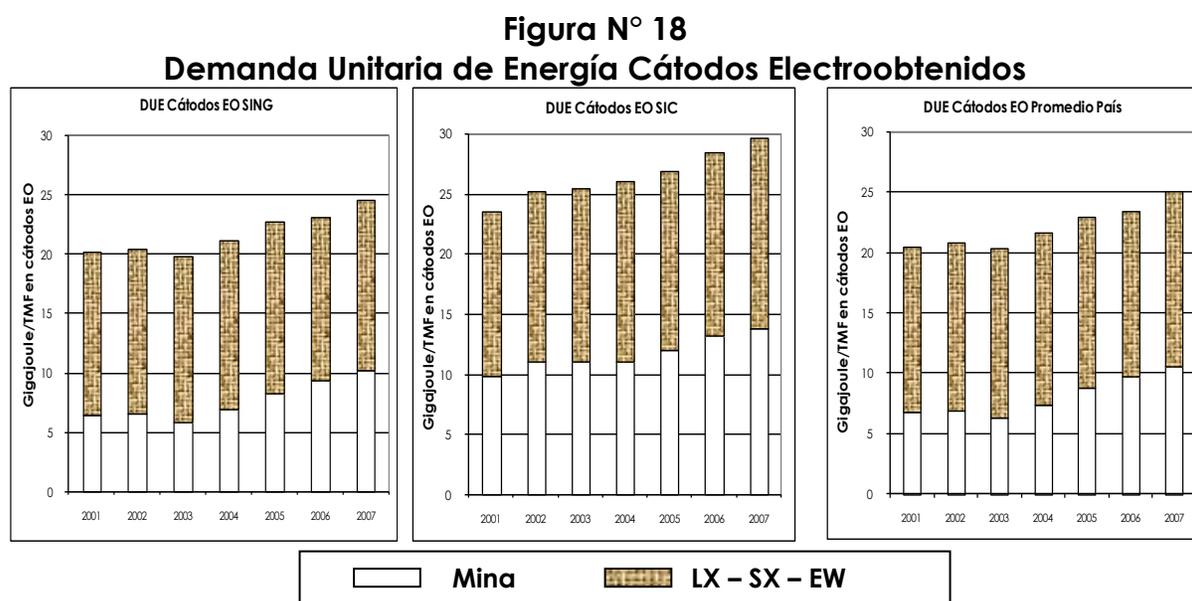
Durante todos los años del estudio las CUEs de los cátodos ER producidos en el SING son entre 1,5 y 2 veces las CUEs de los cátodos ER del SIC.

Los valores de las CUEs para el promedio ponderado de los cátodos ER producidos en el país muestran, con algunas fluctuaciones, una tendencia relativamente estable en los primeros 6 años del período, para luego aumentar fuertemente en el 2007, alcanzando un valor de 3,63 TM de CO<sub>2</sub> equivalente por TMF en cátodos ER.

### 3.3.4 Cátodos EO

Los cátodos electroobtenidos (EO), que se obtienen mediante el tratamiento de minerales lixiviables, incrementaron su producción entre 2001 y el año 2007 sólo en un 19%, debido a que la mayoría de las operaciones de este tipo se encuentran operando a régimen y sólo han entrado en operación en el período dos nuevas faenas. La mayor parte de la producción de cátodos EO se abastece de energía eléctrica del SING.

En la Figura N°18 se muestran los perfiles de DUE de los cátodos EO. Las DUE de los cátodos EO que se producen con energía eléctrica del SING se incrementan entre el año 2001 y el 2007 en un 22%, alcanzando este último año un valor de 24,6 GigaJoule / TMF en cátodos EO.



**Fuente:** Elaborado por la Comisión Chilena del Cobre en base a información de las empresas

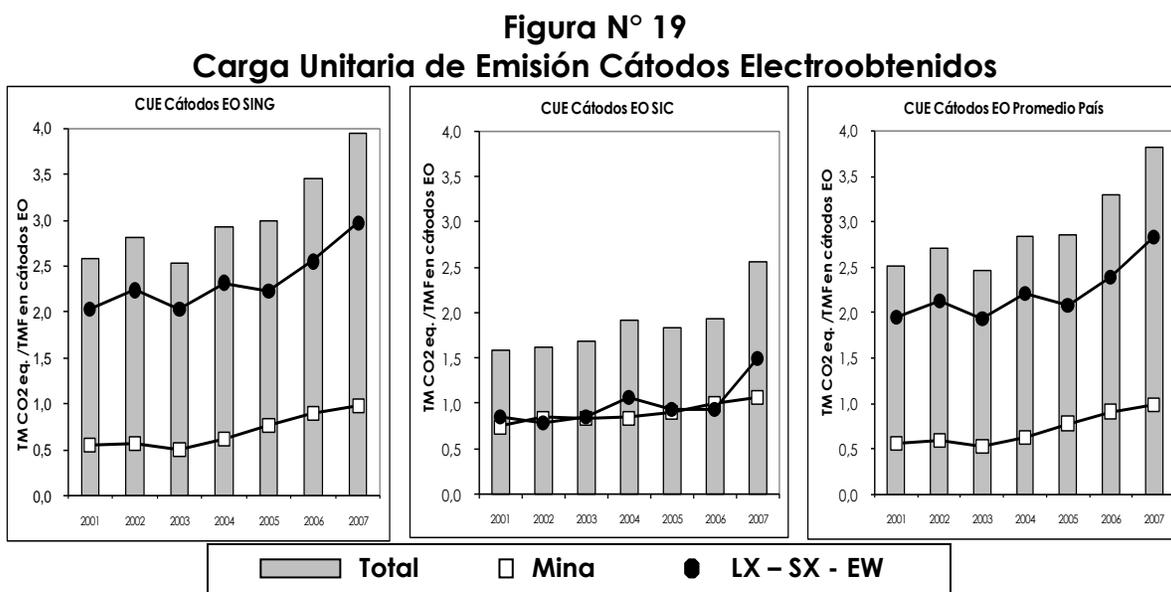
Los cátodos EO producidos con energía eléctrica del SIC tienen DUEs superiores a sus homólogos producidos con energía eléctrica del SING. En

el período los valores se incrementan en un 26%, alcanzando en el año 2007 a 29,7 Gigajoule / TMF en cátodos EO.

La DUE promedio ponderado del total de los cátodos producidos en el país se incrementa entre el 2001 y el 2007 en un 23%, llegando en el último año del estudio a un valor de 25,1 Gigajoule / TMF en cátodos EO. En el promedio ponderado país la mina aumenta su contribución de 33% a 42%, mientras que el conjunto de las operaciones de tratamiento de minerales lixiviables (LX-SX-EW) la disminuye de 67% a 58%.

Cabe destacar que, en todos los años que abarca el estudio, casi el 90% de la producción de cátodos EO proviene de operaciones mineras que se abastecen de energía eléctrica del SING.

La Figura N°19 muestran los perfiles de CUE para los cátodos EO producidos por faenas asociadas al SING y al SIC, y los promedios ponderados país para este producto.



**Fuente:** Elaborado por la Comisión Chilena del Cobre en base a información de las empresas.

Los valores de la CUE para los cátodos EO producidos en faenas que se abastecen del SING aumentan entre 2001 y 2007 en un 53%, alcanzando en el año 2007 un valor de 3,95 TM CO<sub>2</sub> equivalente / TMF en cátodos EO. Debido a la importancia de la contribución de las operaciones LX-SX-EW a la CUE de los cátodos EO (entre 74% y 80%), operaciones que mayoritariamente consumen energía eléctrica y por lo tanto generan emisiones indirectas, el perfil de la CUE sigue un perfil similar a aquel del sistema de generación eléctrica (SING).

Los cátodos EO asociados al SIC muestran CUEs crecientes en el período (61%), influidas principalmente por las contribuciones de las operaciones LX-SX-EW, que aumenta de 53% a 58%, llegando en el año 2007 a un valor de 2,57 TM CO<sub>2</sub> equivalente / TMF en cátodos EO.

Las CUEs de los cátodos EO del SING son entre 1,5 y 1,8 veces superiores a aquellas del SIC.

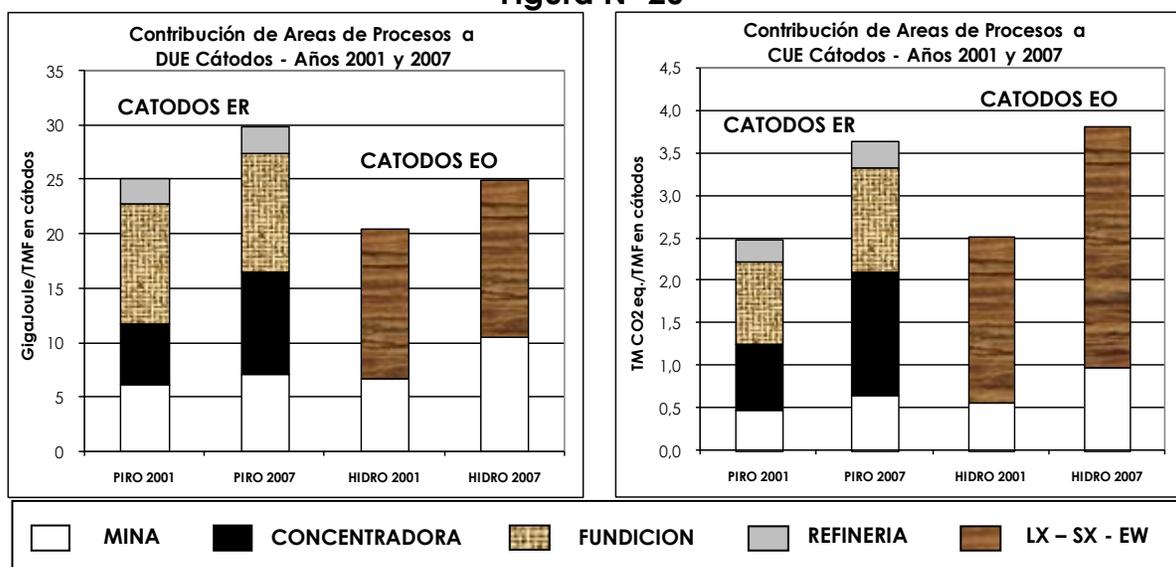
Por la importancia de la producción de cátodos EO que se abastecen de energía eléctrica del SING (casi el 90%), el promedio ponderado país de estos cátodos sigue el perfil de emisiones de los cátodos SING, aumentando las CUEs en el período para alcanzar en el año 2007 un valor de 3,81 TM CO<sub>2</sub> equivalente / TMF en cátodos EO.

### 3.3.5 Cátodos ER versus Cátodos EO

A nivel internacional, por lo general, se presenta a la vía hidrometalúrgica como una opción más “limpia” para producir cobre, en comparación con la vía pirometalúrgica que incluye la etapa de fundición, con la consiguiente emisión de gases y los costos asociados a su captación y tratamiento.

Los gráficos siguientes muestran, para el caso de la minería del cobre de Chile, en forma comparativa las vías piro e hidrometalúrgica, tanto en cuanto a consumo de energía como a emisiones de GEI.

**Figura N° 20**



**Fuente:** Elaborado por la Comisión Chilena del Cobre en base a información de las empresas.

En lo que se refiere a uso de energía, los valores de DUE para los cátodos EO (vía hidro) son más bajos en comparación con los de los cátodos ER (vía piro). Esto significa que la producción de 1 tonelada de cátodos ER gastó en el año 2001 un 19% más de energía que la producción de 1 tonelada de cátodos EO. En el año 2007 el mayor gasto se redujo a 16%. Por otra parte, los consumos unitarios de energía de la vía piro (cátodos ER) muestran en el período una tendencia creciente menor (19%) que aquellos de la vía hidro (cátodos EO) (23%). Lo anterior es un reflejo de las caídas en las leyes de los minerales tratados (10%) y en las recuperaciones del proceso (24%), por un aumento en los últimos de años de mineral procesado en botaderos (dump), lo que implica que para producir 1 tonelada de cobre fino hoy se requiere extraer y procesar una mayor cantidad de mineral que en el año 2001, con el consiguiente mayor gasto de energía.

El ciclo alto de precios del cobre de los últimos años ha rentabilizado el procesamiento de los minerales de baja ley que se encontraban acopiados. Por lo anterior, varias empresas mineras han comenzado en los últimos años a procesar este tipo de minerales en botaderos, donde las recuperaciones son muy bajas.

En materia de emisiones de GEI se produce la situación inversa, los valores de CUE para los cátodos EO (vía hidro) son más altos que aquellos de los cátodos ER (vía piro). Lo anterior significa que en el año 2001 la producción de 1 tonelada de cátodos EO generó un 1% más de emisiones que la producción de 1 tonelada de cátodos ER (en el año 2007 la mayor emisión fue de 5%). Por otra parte, ambas vías de producción de cobre muestran entre los años 2001 y 2007 una tendencia creciente en cuanto a emisiones de GEI. La vía pirometalúrgica (cátodos ER) aumenta las emisiones unitarias en un 47%, mientras que la vía hidrometalúrgica (cátodos EO) lo hace en un 52% en el mismo período.

Los resultados anteriores se explican principalmente porque la producción hidrometalúrgica hace un uso más intensivo de energía eléctrica, particularmente en las etapas de lixiviación-extracción por solventes y electrodeposición, donde es necesario mover materiales y bombear gran cantidad de soluciones. Por otra parte, tal como se indicó anteriormente, casi el 90% de la producción de cátodos EO (vía hidro) proviene de faenas mineras que reciben abastecimiento eléctrico del SING, sistema de generación que experimentó en los últimos años, debido al déficit de abastecimiento de gas natural, un aumento de sus coeficientes unitarios de emisión.

**Tabla N° 3**  
**Valores de DUEs para Productos Comerciales de Cobre**  
**Año 2007**

	<b>Unidades</b>	<b>SING</b>	<b>SIC</b>	<b>Promedio Ponderado País</b>
DUE Concentrados	GJ/TMF en concentrados	<b>12,82</b>	<b>16,18</b>	<b>14,23</b>
DUE Ánodos	GJ/TMF en ánodos	<b>26,07</b>	<b>24,94</b>	<b>25,43</b>
DUE Cátodos ER	GJ/TMF en cátodos ER	<b>29,28</b>	<b>30,47</b>	<b>29,88</b>
DUE Cátodos EO	GJ/TMF en cátodos EO	<b>24,58</b>	<b>29,67</b>	<b>25,08</b>

**Fuente:** Elaborado por la Comisión Chilena del Cobre

**Tabla N° 4**  
**Valores de CUEs para Productos Comerciales de Cobre**  
**Año 2007**

	<b>Unidades</b>	<b>SING</b>	<b>SIC</b>	<b>Promedio Ponderado País</b>
CUE Concentrados	TM CO <sub>2</sub> eq./TMF en concentrados	<b>2,33</b>	<b>1,47</b>	<b>1,97</b>
CUE Ánodos	TM CO <sub>2</sub> eq./TMF en ánodos	<b>4,17</b>	<b>2,38</b>	<b>3,16</b>
CUE Cátodos ER	TM CO <sub>2</sub> eq./TMF en cátodos ER	<b>4,40</b>	<b>2,88</b>	<b>3,63</b>
CUE Cátodos EO	TM CO <sub>2</sub> eq./TMF en cátodos EO	<b>3,95</b>	<b>2,57</b>	<b>3,81</b>

**Fuente:** Elaborado por la Comisión Chilena del Cobre

#### IV CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

Este estudio y su actualización al año 2007 constituyen una experiencia pionera, por lo menos a nivel nacional, en cuanto a entregar información actualizada de un importante sector productivo en relación a consumos de energía y emisiones de gases de efecto invernadero.

La base de datos con la que se trabajó constituye información de primera fuente, ya que fue entregada directamente por cada una de las empresas que participan en la cadena de producción del cobre en Chile.

En relación con el uso de energía, en los años considerados en el estudio (2001 a 2007), la producción de una tonelada de cobre fino, a nivel país, en la forma de cátodo electrorefinado (ER), tuvo un costo energético variable entre 25,2 GJ y 29,9 GJ, dependiendo del año. Para el caso de los cátodos electroobtenidos (EO) este costo energético varió entre 20,5 GJ y 25,1 GJ.

En términos de emisiones de GEI, la producción de una tonelada de cobre fino en la forma de cátodo ER, dependiendo del año, tuvo una carga de emisión (CUE) (a nivel internacional este concepto se denomina "Global Warming Potencial" (GWP)) variable entre 2,46 y 3,63 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente. Por su parte, la carga unitaria de emisión (CUE) del cátodo electroobtenido varió entre 2,46 y 3,81 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente.

El concentrado de cobre también es un producto comercial relevante para el país, ya que en el año 2007 un 40% del cobre fino exportado (2,257 millones de TM) salió como concentrados. La producción de concentrados de cobre de Chile se distribuye aproximadamente en un 56% asociada a la matriz energética del SING y un 44% al SIC.

Si bien los consumos de energía para producir una tonelada de cobre fino en la forma de concentrado son relativamente similares en ambas matrices energéticas (SING y SIC), las CUEs difieren sustancialmente, siendo las de los concentrados SING entre 1,6 y 2,4 veces superiores a las de los concentrados SIC. Esto se explica por la importancia de la contribución de la planta concentradora en el costo total de energía del concentrado, planta que consume fundamentalmente energía eléctrica y por lo tanto, el aporte de emisiones (indirectas) a la CUE del concentrado está fuertemente influenciado por los perfiles de emisión de los sistemas de generación eléctrica.

Es interesante destacar el incremento que se observa en cuanto a consumo unitario de energía a nivel país por parte de la minería del cobre

(38 faenas incluidas en el estudio), el que aumenta entre 2001 y 2007 en un 17%, llegando a un valor de 20,9 GigaJoule / TMF producido. Los resultados anteriores, que se explican por una multiplicidad de factores, tales como disminuciones en la ley de los minerales, aumento de las distancias de acarreo, cambios en la cartera de productos comerciales y cambios tecnológicos, están indicando que el sector minería del cobre, en esta década, ha experimentado un aumento en la intensidad de uso de energía.

Otro hecho relevante en materia de consumo de energía del sector minería del cobre es que se revierte la tendencia a incrementar el consumo de electricidad en desmedro de los combustibles, que alcanzó su punto culminante el año 2004, con una participación de la energía eléctrica de un 57,5% del consumo total de energía del sector, para reducirse este valor en el año 2007a un 55%.

Las emisiones unitarias totales de GEI también experimentan un aumento de 56%, en particular en los últimos 4 años, alcanzando en el 2007 un valor de 2,93 TM CO<sub>2</sub> equivalente / TMF producido. Esto es producto, por una parte, de una menor generación hidráulica en el SIC, y por otra, del déficit de gas natural, que ha significado el reemplazo de éste por otros combustibles (carbón y diesel), con coeficientes unitarios de emisión mucho más elevados, en las plantas de generación de energía eléctrica

El aumento de las emisiones unitarias totales se ha visto impulsado, principalmente, por el aumento de las emisiones indirectas que crecen en el período en un 108%, debido al fuerte incremento de los coeficientes unitarios de emisión de ambos sistemas de generación.

En términos de emisiones de GEI, la conclusión más evidente es la cada vez mayor relevancia que tiene el perfil de emisiones del sistema interconectado de generación de electricidad sobre el perfil de emisiones de las distintas áreas y, en último término, del producto unitario. Esto se aprecia claramente tanto en la magnitud relativa de las emisiones, como en la evolución del perfil unitario de productos en el tiempo, que sigue casi exactamente el perfil del factor de emisión del respectivo sistema interconectado.

A partir de esta observación se puede sugerir una conclusión preliminar interesante: los esfuerzos de reducción de uso de energía que hagan las faenas de la minería del cobre en Chile, o de reducción en el uso de tecnologías que requieran uso directo de combustibles, tendrán un efecto acotado en el perfil de emisiones GEI de los productos, ya que como ha quedado demostrado con el déficit de abastecimiento de gas natural, las

configuraciones de los sistemas SIC y SING son las que tienen un mayor impacto en las emisiones.

Teniendo en consideración la relevancia que ha adquirido en los últimos tiempos la problemática del Calentamiento Global, no obstante que Chile no tiene hasta la fecha compromisos de reducción de emisiones, y teniendo en cuenta que los dos sistemas de generación que abastecen a la minería del cobre han aumentado sus coeficientes unitarios de emisión, tanto por una reducción en la generación hidráulica, como por el cambio hacia combustibles que generan mayores emisiones de GEI que el gas natural, se estima de importancia que a nivel país, al diseñar las políticas energéticas futuras se tengan en consideración las emisiones de gases de efecto invernadero.

No obstante lo anterior, también es claro el desafío directo que la temática del calentamiento global, asociada a la emisión de GEI, presenta a la minería, sector clave de la economía chilena. El sector minero, que ha sido proactivo, y a veces pionero, en materia de gestión ambiental en Chile, enfrenta la posibilidad de avanzar gradualmente, anticipándose y contribuyendo al buen diseño de eventuales regulaciones en materia de emisiones de GEI. Los resultados de este estudio facilitan a las empresas mineras el proceso de identificar las áreas de producción donde hay mayores oportunidades para implementar proyectos de eficiencia energética y reducción de emisiones de GEI, incluyendo oportunidades de desarrollo de negocios a través del Mecanismo de Desarrollo Limpio con transacción de bonos de carbono.

Finalmente, los resultados del estudio dejan en evidencia que los problemas de abastecimiento de gas natural han impactado fuertemente las emisiones de GEI de la minería del cobre del país, incrementando sus emisiones totales entre los años 2003 y 2007 en un 67%. Sólo en el último año (2007) las emisiones totales se incrementaron en 29%. Las emisiones indirectas (consumo de energía eléctrica) representan el 2007 un 76% de las emisiones totales del sector, por lo que es imperativo que, al adoptar decisiones en materia de política energética nacional, se tenga en consideración la temática del Cambio Climático.

## V BIBLIOGRAFIA

PRIEN, 2002. Informe para CODELCO: "Desarrollo de una Metodología destinada a Evaluar las Emisiones de GEI y Realización de un Inventario de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero para CODELCO-Chile en el contexto de la Iniciativa del WRI / WBCSD." Programa de Investigaciones en Energía, Universidad de Chile. CODELCO Chile.

IPCC, 1996. Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Workbook (Volume 2).

<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs5.htm>

IPCC, 1996. Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Reference Manual (Volume 3).

<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs6a.htm>

Comisión Nacional de Energía, Balance Nacional de Energía – Chile.

[http://www.cne.cl/estadisticas/f\\_estadisticas.html](http://www.cne.cl/estadisticas/f_estadisticas.html)

Centros de Despacho Económico de Carga, Anuarios.

<http://www.cdec-sic.cl/datos/anuario.html>

[http://suse-sing.cdec-sing.cl/html\\_docs/anuario.html](http://suse-sing.cdec-sing.cl/html_docs/anuario.html)

Comisión Chilena del Cobre, Anuario Estadísticas del Cobre y Otros Minerales 1985-2004.

T.E. Norgate and W.J. Rankin. Life Cycle Assessment of Copper and Nickel Production.

CSIRO Minerals, Clayton, Victoria, Australia. Published in Proceedings, Minprex 2000, International Conference on Minerals Processing and Extractive Metallurgy, September 2000, pp133-138.

**ANEXO 1**  
**FAENAS MINERAS INCLUIDAS EN EL ESTUDIO**

**Faenas Asociadas al SING**

- Collahuasi
- Cerro Colorado
- Quebrada Blanca
- Chuquicamata
- El Abra
- Radomiro Tomic
- Mantos Blancos
- Michilla
- Lomas Bayas
- El Tesoro
- Fundición Altonorte
- Escondida
- Spence
- Zaldivar
- Cerro Dominador (Planta Santa Margarita)

**Faenas Asociadas al SIC**

- Planta Taltal (ENAMI)
- Las Cenizas - Taltal
- Salvador
- Planta Salado (ENAMI)
- Manto Verde
- Candelaria
- Ojos del Salado
- Punta del Cobre
- Atacama Kozan
- Planta Matta (ENAMI)
- Fundición Paipote (ENAMI)
- Planta Vallenar (ENAMI)
- Pelambres
- Andacollo
- Planta Ovalle (ENAMI)
- Las Cenizas - Cabildo
- El Soldado
- Andina
- Fundición Chagres
- Los Bronces
- Fundición y Refinería Ventanas
- El Teniente
- Valle Central

Este trabajo fue elaborado por:

Sara Inés Pimentel Hunt  
con la colaboración de  
Pedro Santic Contreras

**Diciembre 2008**