

**Comisión Chilena del Cobre  
Dirección de Estudios**

**EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO  
DE LA MINERÍA DEL COBRE DE CHILE  
DE / 002 / 2007**

Registro de Propiedad Intelectual  
© N° 161.801

# INDICE

<b>GLOSARIO</b>	<b>1</b>
<b>RESUMEN EJECUTIVO</b>	<b>2</b>
<b>I INTRODUCCION</b>	<b>11</b>
1.1 El Efecto Invernadero	11
1.2 La Convención Marco de Cambio Climático y el Protocolo de Kyoto	12
1.3 Emisiones de GEI, el Análisis de Ciclo de Vida y la Minería	12
1.4 Emisiones de GEI y la Minería del Cobre	13
1.5 La Minería del Cobre en Chile y el Análisis de Ciclo de Vida	14
<b>II. METODOLOGÍA</b>	<b>16</b>
2.1 Alcance, Unidad Funcional y Exclusiones	16
2.2 Datos de entrada	18
2.3 Cálculos	18
2.3.1 Uso de Energía	18
2.3.2 Emisiones Directas	19
2.3.3 Emisiones Indirectas – Consumo de Combustibles	20
2.3.4 Emisiones Indirectas – Abastecimiento de Energía Eléctrica	20
2.3.5 Demanda Unitaria de Energía y Carga de Emisión	22
2.3.6 Concentrados y Ánodos de Cobre de Fuentes Externas	24
<b>III DISCUSIÓN Y RESULTADOS</b>	<b>25</b>
3.1 Producción, Uso Global de Energía y Emisiones de GEI	25
3.2 Uso de Energía y Emisiones de GEI por Areas de Producción	28
3.2.1 Consumo de Energía	28
3.2.2 Emisiones de GEI por Areas	29
3.3 Demandas Unitarias de Energía y Cargas Unitarias de Emisión por Productos	38
3.3.1 Concentrados	38
3.3.2 Ánodos	39
3.3.3 Cátodos ER	41
3.3.4 Cátodos EO	43
<b>IV CONCLUSIONES Y COMENTARIOS</b>	<b>46</b>
<b>IV. BIBLIOGRAFIA</b>	<b>49</b>
<b>ANEXO 1 - Gases de Efecto Invernadero</b>	<b>50</b>
<b>ANEXO 2 – Faenas Mineras Incluidas en el Estudio</b>	<b>54</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

### INTRODUCCION

Chile, como parte de la Convención de Cambio Climático y del Protocolo de Kyoto, ha debido realizar inventarios de sus emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Aunque Chile no está entre los países con compromisos de reducción de emisiones, la posibilidad de usar el mecanismo de transacción de emisiones (Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL)) para desarrollar proyectos orientados a la reducción de ellas ha generado varias iniciativas en ese sentido.

Por otra parte, Chile es el principal productor de cobre del mundo, con una producción de 5,4 millones de toneladas de cobre fino en el año 2006, proveniente de empresas de la Gran, Mediana y Pequeña Minería. Estas características de la minería del cobre en Chile ofrecen una posibilidad única de explorar los temas de ciclo de vida dentro de un sector operando en el país y produciendo varios tipos de productos, a partir de una variedad de combinaciones tecnológicas y tipos de minería.

Según la información contenida en el Inventario realizado por Chile<sup>1</sup>, en 1998 el sector minería del cobre aportaba el 4,4% del total de las emisiones de CO<sub>2</sub> del país. 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.

Este estudio es un aporte en el sentido que no sólo considera la información sobre consumo de combustibles (emisiones directas), sino que también incluye la energía eléctrica consumida por el sector (emisiones indirectas). La información de base, para su realización, fue proporcionada, en el año 2005, por 30 faenas mineras (99% de la producción chilena de cobre del año 2004), cuyas operaciones abarcan casi cualquier combinación posible existente en la industria en cuanto a tipo de mineral, tipo de mina y tecnología de procesamiento. En el año 2007 se ha programado realizar una actualización del estudio con información de los años 2005 y 2006, donde además se podrá analizar los efectos de los cambios en la matriz energética producto de la crisis del gas natural.

En el estudio se calculan 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 (electrorefinados y electroobtenidos), productos comerciales más relevantes, como también cuantifica emisiones para áreas de procesos (mina, concentradora, fundición, refinera, lixiviación-extracción por solventes-electroobtención, y servicios). Dado que el estudio aborda las emisiones directas e indirectas, también cuantifica el impacto de la matriz energética en las emisiones de productos y procesos.

Finalmente, cabe señalar que, los datos 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.

### ALCANCE

En relación con el alcance del estudio se tiene que:

- Este inventario se circunscribe a las emisiones de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, y N<sub>2</sub>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 dichas operaciones; ii) emisiones indirectas, que corresponden a aquellas generadas por las instalaciones que producen la energía eléctrica utilizada por los procesos de la minería del cobre y las emisiones generadas por los procesos de producción de los combustibles utilizados por las faenas.

---

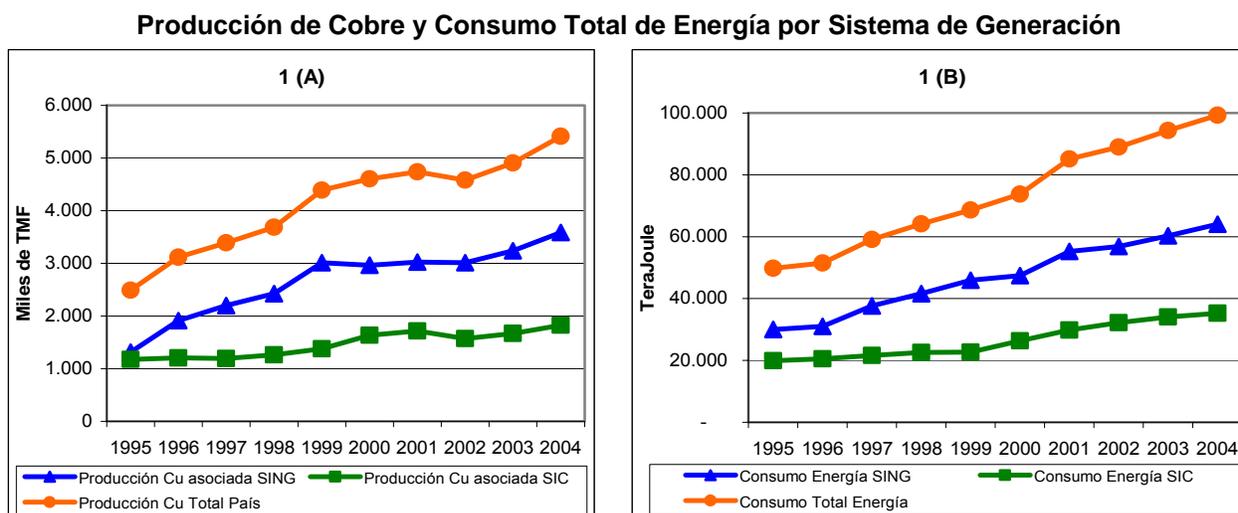
<sup>1</sup> Inventario de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero. Energía, Procesos Industriales y Uso de Solventes. Chile 1986-1998 (2000).

- 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.
- 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 para todos los productos están normalizados por tonelada métrica de cobre fino contenido.
- 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 cubre los años 1995, 2000, 2003 y 2004, que son años que se estimaron como representativos de cambios, tanto en el sector minero, como en la matriz energética del país, y para los cuales existía información disponible respecto de consumos de energía eléctrica y combustibles en la Comisión Chilena del Cobre.

Los cálculos de consumo de energía y generación de emisiones se hicieron siguiendo metodologías y parámetros recomendados y aceptados internacionalmente<sup>2</sup>

## PRINCIPALES RESULTADOS

### Consumo de Energía y Emisiones de la Minería del Cobre en Chile



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

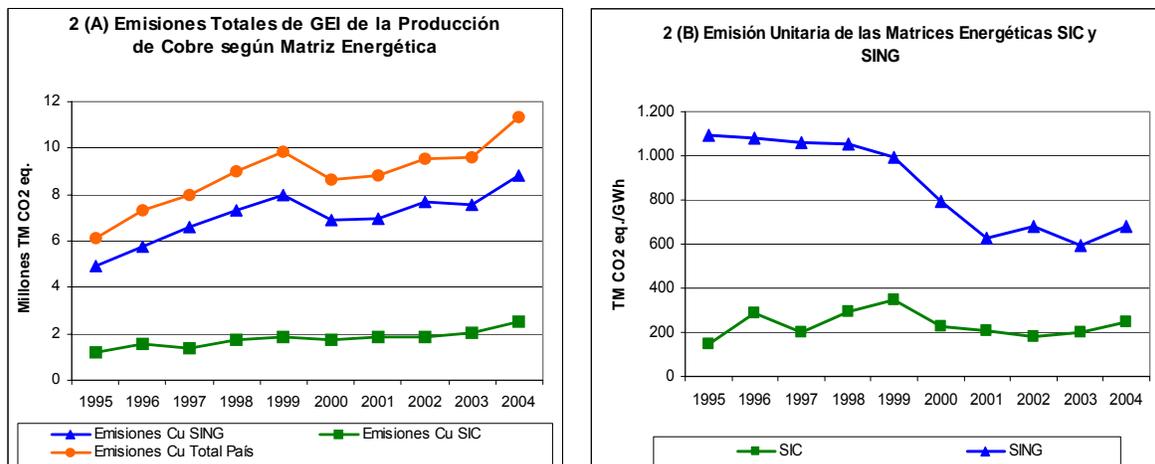
Tal como es esperable, el consumo total de energía de la producción de cobre de Chile (incluye las áreas mina, concentradora, fundición, refinera, tratamiento de minerales lixiviables (LX/SX/EW) y servicios a la producción) se expande de manera muy correlacionada con el aumento en la producción. Los resultados indican que mientras la producción de cobre aumentó en 117% en un período de 10 años, el consumo de energía prácticamente se duplicó (99%).

El análisis por sistema de generación eléctrica señala que el crecimiento de consumo de energía en el SING fue de un 114% y en el SIC un 77%, mientras que las producciones lo hicieron en un 173% y 56% respectivamente.

A nivel país, la fracción de la energía total consumida que corresponde a uso directo de combustibles fósiles en las empresas de la minería del cobre disminuyó de 58,2% en 1995 a 42,7% en el 2004, la diferencia corresponde al consumo de energía eléctrica. Este aumento significativo de la participación del consumo de energía indirecta sobre el total se explica debido a 2 factores: i)

<sup>2</sup> Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 1996

un cambio en la cartera de productos (aumento de producción de cátodos EO) y, ii) un cambio tecnológico en el área de fundiciones, que por una parte disminuyó el consumo directo de combustibles (fusión autógena) y por otra aumentó el uso de energía eléctrica (uso de oxígeno y sistemas de captación y tratamiento de gases).



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

El análisis de la evolución de las emisiones totales anuales de CO<sub>2</sub> equivalente indica que éstas se incrementaron en un 85% en un período de 10 años. Si se tiene en consideración que la producción de cobre aumentó en el mismo período en 117% y el consumo de energía lo hizo en un 99%, entonces el desempeño del sector en cuanto a contribución al calentamiento global se puede considerar positivo. Este mejor desempeño relativo se explica principalmente por los importantes cambios ocurridos en las matrices energéticas en el período y por los cambios en la cartera de productos comerciables.

La Figura 2(B) muestra los factores de emisión unitarios de CO<sub>2</sub> equivalente para los dos sistemas de generación eléctrica en el período. Entre 1995 y 2004 los coeficientes unitarios de emisión del SIC aumentan en un 72,7%, influidos principalmente por el crecimiento en la generación térmica del SIC, que pasa de 14% en 1995 a 42,5% en 2004. Por su parte el SING, disminuye sus coeficientes unitarios en un 38,1%, producto de cambios en los combustibles utilizados. En el año 1995 el principal combustible era carbón, mientras que en el 2004 las centrales generadoras utilizaron principalmente gas natural. Esta tendencia podría haberse revertido en los últimos años (2005-2006) producto de los problemas de abastecimiento de gas natural, que han significado cambios en los combustibles utilizados por las centrales generadoras.

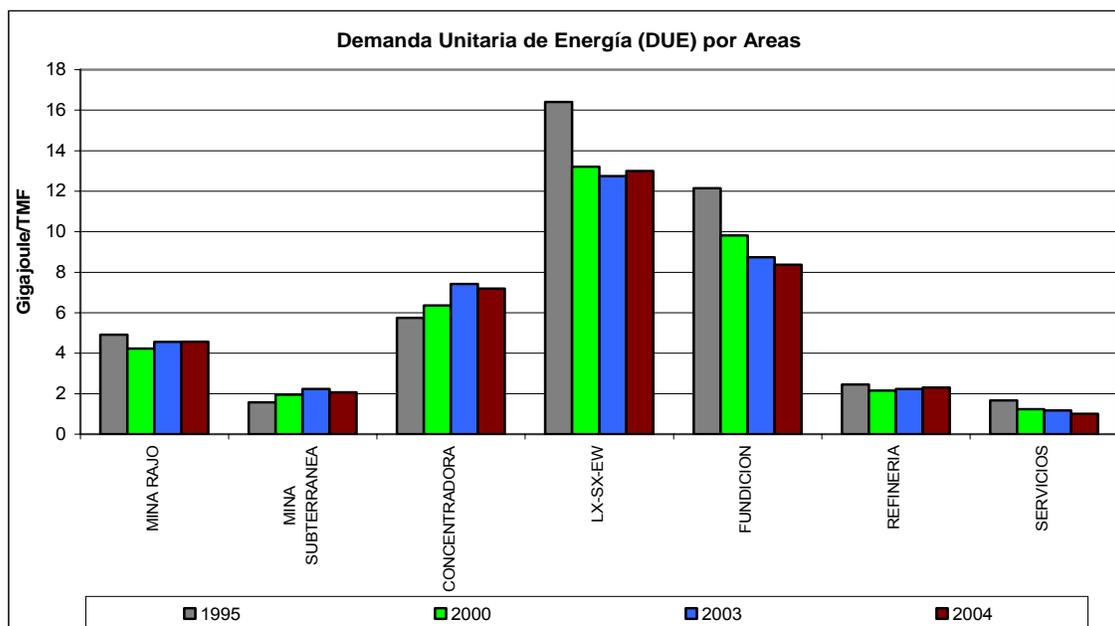
Adicionalmente, los perfiles de la Figura 2(B) indican tres importantes características de relevancia para este estudio. Primero, el SING emite entre 2,7 y 7,6 veces más toneladas de CO<sub>2</sub> por GWh generado que el SIC, lo que se debe a que la generación eléctrica en el SING es prácticamente 100% térmica, en cambio en el SIC, que emite menos GEI, predomina la generación hidráulica. Segundo, el SING ha disminuido sostenidamente sus emisiones de CO<sub>2</sub> por GWh desde mediados de la década del 90. Lo anterior se explica porque en 1995 la matriz de generación del SING era 63% carbón, 21% diesel y 15% fuel oil, mientras que en el 2004 un 58,7% de la energía se generó con gas natural, 33,5% con carbón, 3,8% diesel y 3,5% fuel oil. Finalmente, el SIC muestra una tendencia creciente en las emisiones, pero con alzas y bajas temporales. Obviamente, estas tres 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.

La participación de las emisiones indirectas (uso de energía eléctrica) en la minería del cobre en Chile es muy relevante, fluctuó entre 1995 y el 2004 entre un 64,3% y un 73,3% del total de emisiones de GEI generadas por las operaciones del sector. En el año 2004 la contribución de las

emisiones indirectas de las faenas asociadas al SING al total de emisiones fue de 76% y en las operaciones que se abastecen de energía eléctrica del SIC fue de 64%.

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

Para efectos del estudio se definieron los indicadores Demanda Unitaria de Energía (DUE) y Carga Unitaria de Emisión (CUE), que estiman el gasto acumulado de energía y las emisiones de GEI generadas para producir una unidad de producto (1 tonelada de cobre fino contenido).



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

El comportamiento de las DUE's de las distintas áreas de producción de cobre se encuentra explicado en detalle en el estudio "Coeficientes Unitarios de Consumo de Energía de la Minería del Cobre. 1995 – 2004", elaborado por la Comisión Chilena del Cobre en el año 2005 (disponible en la página web [www.cochilco.cl](http://www.cochilco.cl)).

La menor DUE de la minería subterránea se explica porque sólo extrae mineral y el método de explotación hace uso de la fuerza de gravedad, mientras que la minería de rajo debe mover grandes cantidades de lastre o estéril para acceder al mineral.

Por definición metodológica el área de tratamiento de minerales lixiviables integra los procesos de lixiviación(LX), extracción por solventes(SX) y electroobtención(EW), que significa pasar en una sola etapa de un mineral con un 1% de cobre a un producto con 99,99%. Este nivel de agregación explica la mayor DUE respecto de las otras áreas del proceso. Los valores decrecientes en el tiempo se explican por economías de escala, ya que en el año 1995 estaban recién entrando en operación los primeros grandes proyectos hidrometalúrgicos.

Los valores decrecientes de DUE en el área de fundición se deben a la migración hacia tecnologías de fusión autógenas (cambio de hornos reverbero por convertidores Teniente).

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

### Cargas Unitarias de Emisión por Areas

	Unidades	1995	2000	2003	2004
<b>Mina Rajo</b>	TM CO <sub>2</sub> eq./TMF mineral	0,51	0,37	0,38	0,40
<b>Mina Subterránea</b>	TM CO <sub>2</sub> eq./TMF mineral	0,08	0,12	0,13	0,15
<b>Concentradora</b>	TM CO <sub>2</sub> eq./TMF concentrado	0,91	0,79	0,79	0,91
<b>Fundición</b>	TM CO <sub>2</sub> eq./TMF ánodo	1,22	0,93	0,74	0,79
<b>Refinería</b>	TM CO <sub>2</sub> eq./TMF cátodo ER	0,34	0,26	0,22	0,23
<b>LX-SX-EW</b>	TM CO <sub>2</sub> eq./TMF cátodo EO	3,33	2,29	1,76	2,02
<b>Servicios</b>	TM CO <sub>2</sub> eq./TMF total producido	0,16	0,13	0,10	0,10

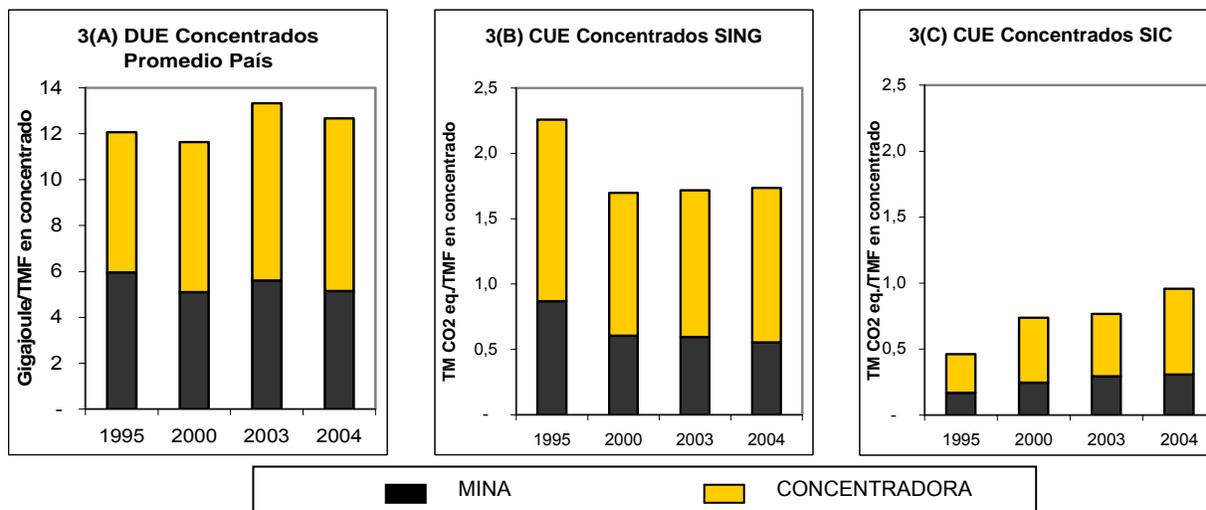
Fuente: Elaborado por la Comisión Chilena del Cobre en base a información de las empresas.

### Consumos de Energía y Emisiones por Productos

#### Concentrados

En el año 2004 el país exportó 2,165 millones de TM de cobre fino en 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.

La siguiente Figura 3(A) muestra la evolución de los valores totales de DUE para este producto durante el período en estudio. El perfil de la DUE de los concentrados promedio país sigue la tendencia de los concentrados SING debido a la mayor proporción de producción de este producto asociado a ese sistema de generación.



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

Como se observa en las Figuras 3(B) y 3(C), en términos de emisiones de GEI, la producción de una tonelada de cobre fino en la forma de concentrado de cobre de faenas asociadas al SING, dependiendo del año, tuvo una CUE variable entre 1,70 y 2,26 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente. Por su parte, la CUE de los concentrados SIC varió entre 0,46 y 0,96 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente.

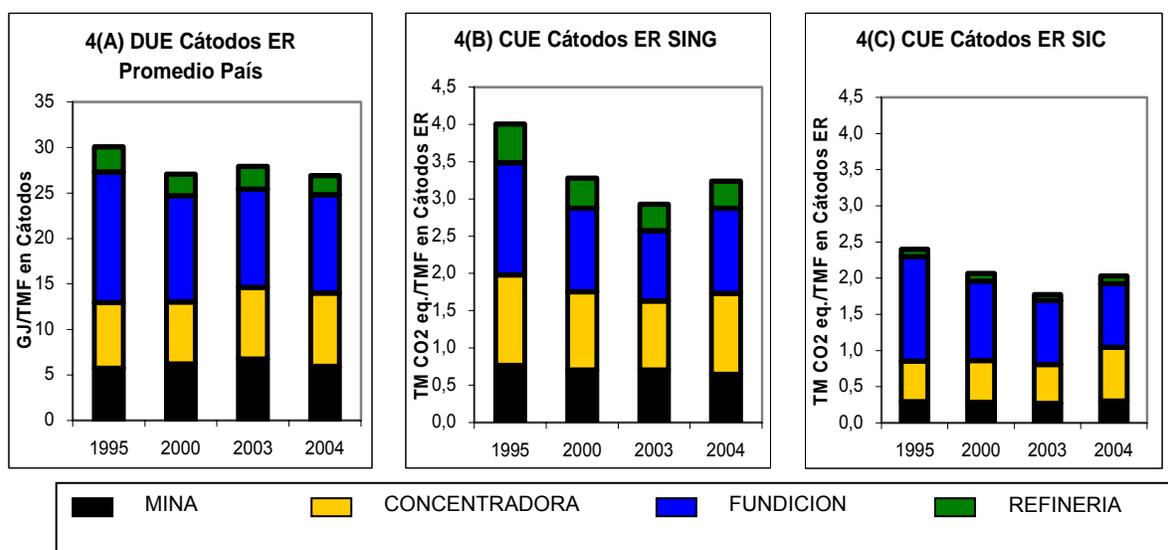
Lo anterior significa que, si bien, los consumos de energía para producir una tonelada de cobre fino en la forma de concentrado son bastante similares en ambas matrices energéticas (SING y SIC), las CUEs difieren sustancialmente, siendo las de los concentrados SING entre 2 y 5 veces superiores a las de los concentrados SIC. Esto se explica por la importancia de la contribución de la planta concentradora en el consumo 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.

## Cátodos Electrorefinados (ER)

En el año 2004 el país produjo 1,051 millones de TMF en cátodos ER. Las siguientes Figuras 4(A),4(B) y 4(C) muestran los resultados para este producto comercial de la minería del cobre en Chile

En relación con el uso de energía, en los años considerados en el estudio, la producción de una tonelada de cobre fino, a nivel país, en la forma de cátodo electrorefinado (ER), tuvo un costo energético variable entre 26,92 GJ y 30,07 GJ, dependiendo del año.

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) variable entre 3,43 y 2,46 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente. Tal como se observa en las figuras (B) y (C) las CUEs de los cátodos ER están fuertemente influenciadas por el sistema de generación eléctrica que abastece a la respectiva faena. Durante todos los años del estudio las CUEs de los cátodos ER producidos en el SING son alrededor de 1,6 veces las CUEs de los cátodos ER del SIC, esto para un consumo de energía (DUE) muy similar en ambos sistemas de generación eléctrica.



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

La única información disponible para efectuar algunas comparaciones dentro de la industria es la publicada en el paper de Norgate y Rankin (2000)<sup>3</sup> para cátodos ER, que estima un consumo de energía de 33 GJ / TMF, valor que está en el rango del calculado para Chile. En términos de CUE, el citado paper indica para el cátodo ER un valor de 3,3 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente /TMF, valor que también está en el rango del promedio ponderado país para cátodos ER.

## Cátodos Electroobtenidos (EO)

En el año 2004, la producción chilena de cátodos EO fue de 1, 64 millones de TMF, lo que representa un 57,7% de la producción total país de cobre refinado. Cabe destacar que a nivel mundial, ese mismo año, de una producción total de cobre refinado primario de alrededor de 15,7 millones de toneladas métricas, el 83,3% se produjo por métodos pirometalúrgicos y el 16,7% por extracción por solvente y electro-depositación.

<sup>3</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.

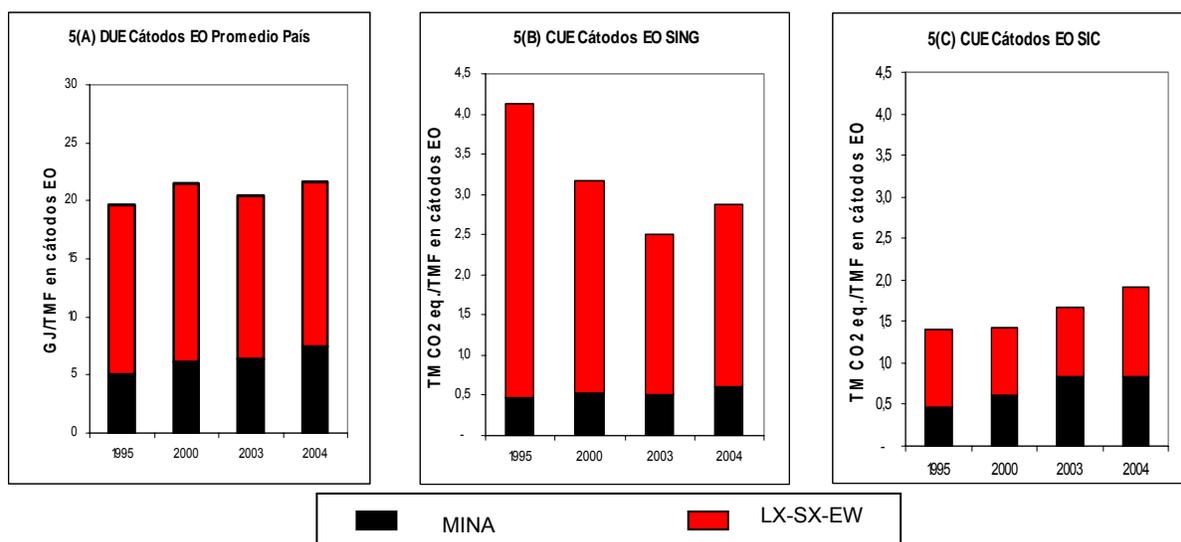
En todos los años que abarca el estudio, más del 90% de la producción de cátodos EO proviene de operaciones mineras que se abastecen de energía eléctrica del SING.

En relación con el uso de energía, en los años considerados en el estudio, la producción de una tonelada de cobre fino, a nivel país, en la forma de cátodo EO tuvo un costo energético variable entre 19,7 GJ y 21,7 GJ (Figura 5(A)).

En términos de emisiones de GEI, la producción de una tonelada de cobre fino en la forma de cátodo EO asociados al SING, dependiendo del año, tuvo una carga de emisión (CUE) variable entre 4,1 y 2,5 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente.

Comparando con la información disponible a nivel internacional, en el paper de Norgate y Rankin (2000) se indica un valor de 64 GJ /TMF como DUE para los cátodos EO, valor que es muy superior a los valores determinados para la producción de este tipo de producto en Chile. En el caso de las emisiones, el trabajo australiano muestra valores de 6,2 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente /TMF para cátodos EO, valor que también es superior a los resultados para este producto en Chile. Es importante destacar que los cálculos realizados en el citado paper se basan en información bibliográfica de diversas fuentes y no corresponden a datos obtenidos directamente de faenas mineras, como es el caso de este estudio.

Las diferencias en el caso de los consumos de energía podrían explicarse por las leyes y tipos de minerales procesados, el tipo de proceso de lixiviación utilizado (lixiviación en bateas, agitada, en pilas (móviles o fijas), in situ, etc.) y por las escalas de las operaciones. Las diferencias en los valores de emisión unitaria se explicarían por los diferentes tipos de matriz energética. Todo lo anterior no está detallado en el citado paper.



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

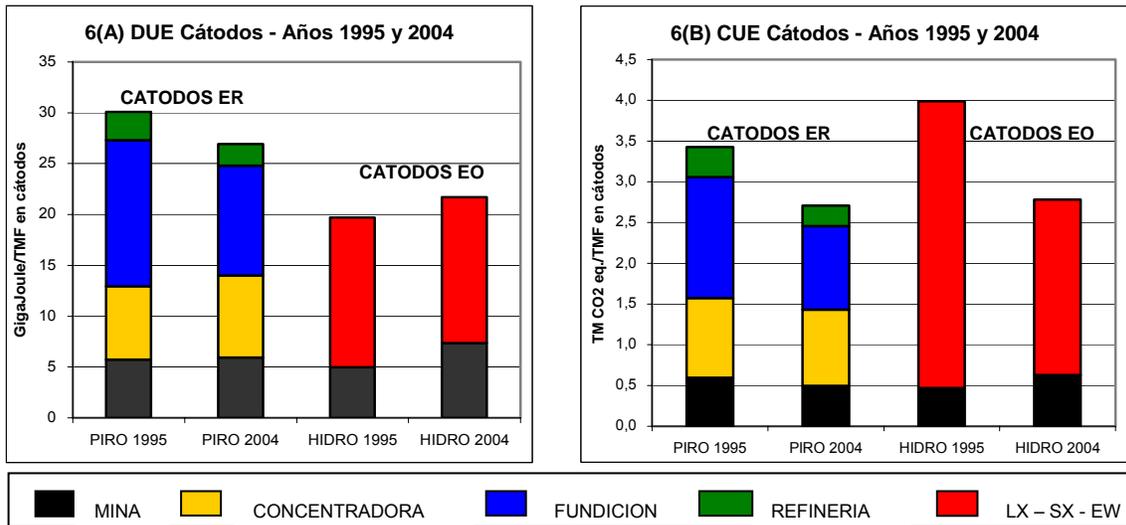
### Análisis Comparativo DUE y CUE Cátodos ER versus Cátodos EO

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 en Chile, en forma comparativa las vías piro e hidrometalúrgica, tanto en cuanto a consumo de energía (Figura 6(A)) como a emisiones de GEI (Figura 6(B)).

La comparación entre un cátodo producido por pirometalurgia (ER) y uno producido por hidrometalurgia (EO) indica que el primero fue, en el año 1995 un 53% más caro energéticamente que el segundo, valor que se reduce a un 24% en el año 2004.

En términos de emisiones, se produce la situación inversa. En el año 1995 la producción de una tonelada de cátodos EO generó un 16% más de emisiones que la producción de una tonelada de cátodos ER, en el año 2004 esta mayor emisión fue de un 3%.

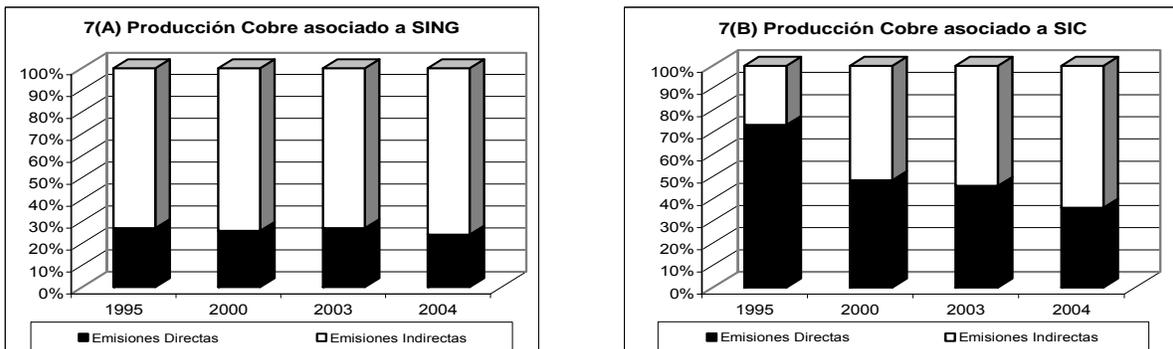


Fuente: Elaborado por la Comisión Chilena del Cobre en base a información de las empresas.

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, más del 90% de la producción de cátodos EO (vía hidro) proviene de faenas mineras que reciben abastecimiento eléctrico del SING, sistema de generación que experimentó una fuerte reducción de sus coeficientes unitarios de emisión entre los años 1995 y 2004, lo que se refleja en la reducción de un 30% de la CUE de los cátodos EO (hidro) en el período. Sin embargo, esta situación podría revertirse en los años siguientes debido a la crisis del gas, que ha significado que las generadoras han debido cambiar a otros combustibles.

### Importancia de Emisiones Indirectas

Tal como se visualiza en las siguientes figuras, las emisiones indirectas en el año 2004 alcanzaron a un 76% del total de las emisiones generadas por la producción de cobre que se abastece de energía eléctrica del SING. En el caso de la producción de cobre adscrita al SIC este valor fue de 64%.



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

La producción de cobre asociada al SIC redujo en el período sus emisiones directas (consumo directo de combustibles fósiles en las empresas mineras) debido principalmente a los cambios tecnológicos en las fundiciones impulsados por medidas ambientales.

### **Principales Hallazgos del Estudio**

La importante participación de las emisiones indirectas en el total de emisiones de la minería del cobre, implica que, cualquier esfuerzo que realicen las faenas mineras para reducir el uso de energía en los procesos o para implementar nuevas tecnologías que no requieran uso directo de combustibles, tendrán un efecto acotado en el perfil de emisiones de GEI de sus áreas y productos, puesto que la principal contribución corresponde a las emisiones indirectas, que son función de las configuraciones de los sistemas de generación eléctrica SIC y SING, situación respecto de la cual la minería del cobre tiene una muy limitada capacidad de gestión.

Es interesante destacar la reducción que se observa en cuanto a consumo unitario de energía a nivel país por parte de la minería del cobre, el que disminuye entre 1995 y 2004 en un 8,4%, llegando a un valor de 18,4 GigaJoule / TMF producido. Las emisiones unitarias totales de GEI también experimentan una reducción de 15%, alcanzando en el 2004 un valor de 2,1 TM CO<sub>2</sub> equivalente / TMF producido.

A la reducción en los consumos unitarios de energía ha contribuido, en particular en lo que se refiere a consumo directo, el cambio tecnológico que ha significado la detención de los hornos reverbero y su reemplazo por convertidores Teniente en la etapa de fundición. Estas reducciones se verifican a pesar de: aumentos en producción; disminuciones de ley, e introducción de tecnologías de captura de gases que son intensivas en uso de energía eléctrica. El alcance general del presente estudio, sin embargo, no permite identificar a qué combinación de factores y tecnologías específicas responde la reducción señalada. Lo que sí es claro es que esta reducción se dio en conjunto con una creciente dependencia de energía eléctrica, en todas las faenas productivas.

La disminución de las emisiones unitarias totales se ha visto impulsada, por una parte, por una reducción de las emisiones directas debido al menor uso directo de combustibles fósiles en el proceso (cambio tecnológico), y por otra, por la fuerte reducción de los coeficientes unitarios de emisión del SING, sistema de generación al que se encuentra asociada un 66% de la producción de cobre fino del país. Sin embargo, la contribución de este último factor podría reducirse producto de la crisis del gas argentino del último tiempo.

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 en el año 2004 el 66% de la producción de cobre se abasteció de energía eléctrica del SING, transformándose la minería en el principal cliente de este sistema de generación (más del 80%)<sup>4</sup>, se estima de la mayor importancia que, al diseñar las políticas energéticas futuras se tengan en consideración las emisiones de gases de efecto invernadero.

Este estudio también constituye un aporte para las empresas mineras, en el sentido que les permite identificar las áreas de producción donde hay mayores oportunidades para implementar proyectos de eficiencia energética, ya sea directamente o a través del Mecanismo de Desarrollo Limpio con transacción de bonos de carbono.

---

<sup>4</sup> Estadísticas de Operación 1995 – 2004 CDEC SING.

## I. INTRODUCCION

### 1.1 El Efecto Invernadero<sup>5</sup>

En la atmósfera existen una serie de gases que dejan pasar la radiación solar (luz visible) a la superficie terrestre, atrapando la radiación infrarroja (radiación térmica), que es reemitida por ésta. Si estos gases no existieran la radiación térmica escaparía al espacio. Este atrapamiento de la radiación infrarroja es lo que se conoce como “efecto invernadero”. Los gases que influyen en el balance de radiación entre la superficie terrestre y la atmósfera se conocen como radiativamente activos o gases de efecto invernadero (GEI)<sup>6</sup>.

Aún en ausencia de interferencia humana el efecto invernadero está constantemente en operación. Una serie de constituyentes naturales de la atmósfera son radiativamente activos. Los más importantes son el vapor de agua (H<sub>2</sub>O), el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y las nubes, que contribuyen con aproximadamente un 90% al efecto invernadero natural, mientras que el resto se debe al ozono (O<sub>3</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) y otros gases presentes naturalmente en la atmósfera.

Ciertas actividades humanas, tales como la quema de combustibles fósiles, los procesos industriales y otros, son causa de emisión de GEI. Estas emisiones provocan un cambio en el balance radiativo del sistema atmosférico de la superficie.

Los GEI pueden dividirse en tres categorías: (1) los radiativamente activos, tales como el vapor de agua, dióxido de carbono, ozono, metano, óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) y los clorofluorocarbonos (CFCs), que ejercen un efecto climático directo; (2) los química / fotoquímicamente activos, tales como el monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>)<sup>7</sup>, que ejercen efectos climáticos indirectos a través de reacciones químicas que determinan la concentración en la atmósfera de radicales hidroxilos (OH), CH<sub>4</sub> y O<sub>3</sub>, y; (3) las emisiones de aerosoles.

Es interesante notar que hace ya unos 150 años que existe conciencia que la emisión de ciertos gases puede afectar el clima terrestre. Fourier fue probablemente el primero en discutir la relación entre CO<sub>2</sub> y el efecto invernadero en 1827, al compararlo con el calentamiento del aire aislado bajo una placa de vidrio. A principios de este siglo, Arrhenius hizo el primer cálculo de cambio climático. Su resultado fue que un incremento del CO<sub>2</sub> por un factor de 2,5 - 3 aumentaría la temperatura global media superficial en 8 - 9 °C. En 1941, Flohn notó que la producción antropogénica de CO<sub>2</sub> perturba el ciclo del carbono llevando a un incremento constante de éste en la atmósfera. En 1957, Revelle y Suess concluyeron que las actividades humanas estaban iniciando un experimento geofísico global que llevaría a cambios climáticos detectables en pocas décadas. En el mismo año, Keeling y colaboradores comenzaron el primer programa de mediciones de CO<sub>2</sub> en el Mauna Loa (Hawaii) y en el Polo Sur, como parte del Año Geofísico Internacional.

A partir de entonces se han realizado una serie de estudios y conferencias mundiales que se han ocupado del tema. En ellos se ha establecido que existe un riesgo de consecuencias importantes derivadas de un cambio acelerado del sistema climático a nivel planetario. Existe evidencia de que en el pasado variaciones de un par de grados en la temperatura media superficial, estuvieron asociadas con cambios en el nivel de los océanos, casquetes polares, superficie boscosa y climas regionales. En la actualidad, dichos cambios podrían tener importantes impactos en el desarrollo socioeconómico de muchos países.

Sin embargo, hasta la fecha no existe un consenso respecto de la magnitud de los impactos, tanto globales como regionales, asociados a un calentamiento global dado. Ello se debe, en parte, a la complejidad del sistema bajo estudio, siendo por ende difícil su modelación.

---

<sup>5</sup> Basado en “Inventario de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero. Sector energía. Chile 1993”

<sup>6</sup> Ver Anexo 1 para una lista de los GEI y sus principales características.

<sup>7</sup> El SO<sub>2</sub> no es un gas de efecto invernadero, pero su presencia en la atmósfera puede influir en el clima.

Ante esta falta de consenso han surgido dos visiones contrapuestas:

- *No actuar hasta que exista certeza sobre los impactos.* Quienes sustentan esta visión (liderada principalmente por Estados Unidos) argumentan que las incertidumbres científicas son aún demasiado grandes como para gastar recursos en costosas medidas preventivas. Abogan por más investigaciones para reducir dichas incertidumbres.

- *Actuar ahora para minimizar los riesgos.* Se sostiene que, a pesar de que existen dudas, si efectivamente se produce un calentamiento global, la falta de acción podría llevar a consecuencias catastróficas. Por lo tanto, se deberían establecer desde ya las políticas y realizar las inversiones necesarias para minimizar los riesgos o adaptarse a los cambios. (Posición apoyada por una gran cantidad de científicos, principalmente el Panel Intergubernamental de Cambio Climático de Naciones Unidas (IPCC), ONG's, y diversos países, principalmente la Unión Europea).

## **1.2 La Convención Marco de Cambio Climático y el Protocolo de Kyoto**

El tema del cambio climático global y su relación con los niveles de ciertos gases en la atmósfera han sido el foco de la atención internacional durante la última década.

En junio de 1992 cerca de 150 países firmaron en Río de Janeiro la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático (UNFCCC), cuyo objetivo es la estabilización de las concentraciones de GEI en la atmósfera a un nivel tal que prevenga la interferencia antropogénica dañina con el sistema climático. Dicho nivel debe alcanzarse dentro de un período de tiempo suficientemente largo, como para permitir a los ecosistemas adaptarse naturalmente al cambio climático.

En 1997 los gobiernos acordaron el Protocolo de Kyoto del Convenio Marco sobre Cambio Climático de las Naciones Unidas (UNFCCC). El Protocolo es un compromiso legalmente vinculante de reducción de emisiones para todos los países detallados en el Anexo I de la Convención. Bajo este compromiso, Japón debía reducir un 6%, EEUU un 7% y la UE un 8%. Otros países tenían el compromiso de estabilizar sus emisiones como Nueva Zelanda, Rusia o Ucrania, o la posibilidad de incrementarlas como Noruega un 1% y Australia un 8%. Se estableció el compromiso de lograr una reducción del 5,2% para el año 2010 sobre los niveles de 1990. El Protocolo también incluyó la posibilidad de establecer un comercio de emisiones entre países.

El Protocolo entró en vigor en febrero de 2005, sólo después de que 55 naciones que suman el 55% de las emisiones de gases de efecto invernadero lo ratificaron. En la actualidad lo han ratificado 166 países. Cabe destacar que Estados Unidos aún no lo ratifica.

Chile ratificó el Protocolo de Kyoto en el año 2002, sin embargo, como el país no está incluido en el Anexo I de la Convención, no tiene por el momento compromisos de reducción de emisiones y sólo debe cumplir con las obligaciones generales establecidas en ella, las que dicen relación con la elaboración periódica de inventarios, la formulación de programas nacionales, y cooperación en la transferencia de tecnologías, prácticas y procesos que controlen, reduzcan o prevengan las emisiones.

## **1.3 Emisiones de GEI, el Análisis de Ciclo de Vida y la Minería**

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.

La industria minera de minerales y metales ha comenzado lenta pero decididamente a adoptar el enfoque de Análisis de Ciclo de Vida, tanto como una herramienta de gestión ambiental, como una fuente de datos de inventario para usuarios aguas abajo. Sin embargo, no existen estudios de ciclo de vida de procesos mineros específicos que estén fácilmente disponibles. En el sector de los metales, la industria del molibdeno, zinc, cobre, plomo, acero y níquel están comenzando a abordar inventarios de ciclo de vida sectoriales, generalmente en el contexto de acuerdos con sus respectivas asociaciones de metales (ICA, IMO, etc.). Esto es, estudios que entregan el perfil de ciclo de vida de una unidad promedio de producto, en la forma que éste es producido por varias compañías, generalmente limitada al hemisferio occidental.

La disponibilidad pública de los resultados de estos estudios es variable y a menudo está restringida a los participantes y usuarios aguas abajo. Las compañías individuales generalmente son reacias a publicar este tipo de información, en parte, porque en el pasado se utilizó para hacer comparaciones inapropiadas entre productos alternativos, conduciendo a controversias inútiles. También, muchos grupos en la industria temen que los inventarios de emisiones de ciclo de vida, que por su naturaleza incluyen todo tipo de emisiones, puedan ser mal utilizados por otras partes interesadas para respaldar reclamos en contra de la industria. El sector minero es comprensiblemente muy sensible a tales temas. Como resultado, es escasa la información de ciclo de vida de operaciones específicas, y los analistas a menudo deben basar las estimaciones en datos escasos y heterogéneos de dudosa calidad.

#### **1.4 Emisiones de GEI y la minería del cobre**

Chile, como parte de la Convención y del Protocolo de Kyoto, ha realizado inventarios de sus emisiones de GEI<sup>8</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.

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>9</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 electrorefinación. Esto se denomina procesamiento pirometalúrgico e incluye: reducción de tamaño;

---

<sup>8</sup> Inventario de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero. Energía, Procesos Industriales y Uso de Solventes. Chile 1986-1998 (2000).

<sup>9</sup> Inventario 1986-1998, Anexo A-25.

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. En un análisis genérico de ciclo de vida de la producción de cobre, Norgate and Rankin<sup>10</sup> determinaron que los procesos hidrometalúrgicos tenían un potencial de calentamiento global (PCG) mucho más alto que los procesos pirometalúrgicos, aunque sus 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 2004, de una producción total mundial de cobre refinado primario de alrededor de 15,7 millones de toneladas métricas, el 83,3% se produjo por métodos pirometalúrgicos y el 16,7% por extracción por solvente y electro-depositación. En el mismo año, Chile produjo 2,84 millones de toneladas de cobre refinado, de las cuales el 57,7% 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>11</sup>.

## 1.5 La Minería del Cobre en Chile y el Análisis de Ciclo de Vida

Chile es el principal productor de cobre del mundo, con una producción de 5,4 millones de toneladas de cobre fino en el año 2004, proveniente de empresas de la Gran, Mediana y Pequeña Minería. Este estudio considera la información proporcionada por 30 faenas mineras<sup>12</sup>, cuyas operaciones abarcan casi cualquier combinación posible existente en la industria en cuanto a tipo de mineral, tipo de mina y tecnología de procesamiento, cubriendo el 99% de la producción chilena

<sup>10</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>11</sup> Anuario Estadísticas del Cobre y Otros Minerales 1985-2004. Comisión Chilena del Cobre.

<sup>12</sup> Ver detalle en Anexo 2

de cobre del año 2004. En la Tabla N° 1 siguiente se muestran los tipos de mina, mineral, procesos y productos considerados.

**Tabla N° 1**  
**Tipos de Mina, Mineral, Procesos y Productos**

Tipo de Mina	Mineral	Proceso	Producto de Cobre
Rajo /Subterránea	Sulfuros		Concentrado
Rajo	Sulfuros	Piro	Cátodos ER
Rajo	Oxidos	Hidro	Cátodos EO
Subterránea	Sulfuros		Anodos

Casi el 88% del cobre extraído proviene de minas a rajo abierto, y sólo un 12% se extrae de minas subterráneas.

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 (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), hidrofluorocarbonos (HFCs), perfluorocarbonos (PFCs) y hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>), el presente inventario se circunscribe a las emisiones de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, y N<sub>2</sub>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 como se muestra en la Figura N° 1. 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 será 1 tonelada métrica de cobre fino (TMF), de manera que todos los datos de consumo de energía y emisión de GEI estarán 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 cubre los años 1995, 2000, 2003 y 2004, que son años que se estimaron como representativos de cambios, tanto en el sector minero, como en la matriz energética del país. El último año para el cual existía información disponible en la Comisión Chilena del Cobre sobre consumos de energía eléctrica y combustibles en la minería del cobre de Chile es el 2004. El 2007 está programado realizar una actualización del estudio con cifras hasta al año 2006.

La producción de cobre de Chile tiene tres principales co-productos (en algunas operaciones). El molibdeno se produce por flotación selectiva de los concentrados, obteniéndose un concentrado de cobre y un concentrado de molibdeno (en algunos casos éste se trata para obtener óxido de molibdeno). En esta etapa del estudio no se pudo obtener información separada de uso de energía para los procesos específicos del molibdeno, por lo que no se requieren decisiones de distribución y las emisiones de GEI asociadas a ellos se informan como parte de las emisiones ligadas a la producción de cobre. Esta es una decisión razonable, ya que la producción de cobre es el objetivo económico del proceso, y al asignar las emisiones ligadas al molibdeno a la producción de cobre no se está pasando por alto ninguna emisión. Los barros anódicos que se producen en la refinera son precipitados electrolíticos que contienen metales preciosos, entre otras impurezas, y se exportan para un procesamiento posterior. A pesar de que ellos alcanzan interesantes precios en los mercados internacionales, los volúmenes de producción son demasiado pequeños para justificar un tratamiento separado. Finalmente, las plantas de tratamiento de gases de las fundiciones producen ácido sulfúrico, el que se comercializa o utiliza en otras faenas mineras para el tratamiento de los minerales lixiviables. El ácido sulfúrico es, entonces, un co-producto resultante de los esfuerzos para disminuir las emisiones gaseosas. Todas las emisiones de GEI asociadas a

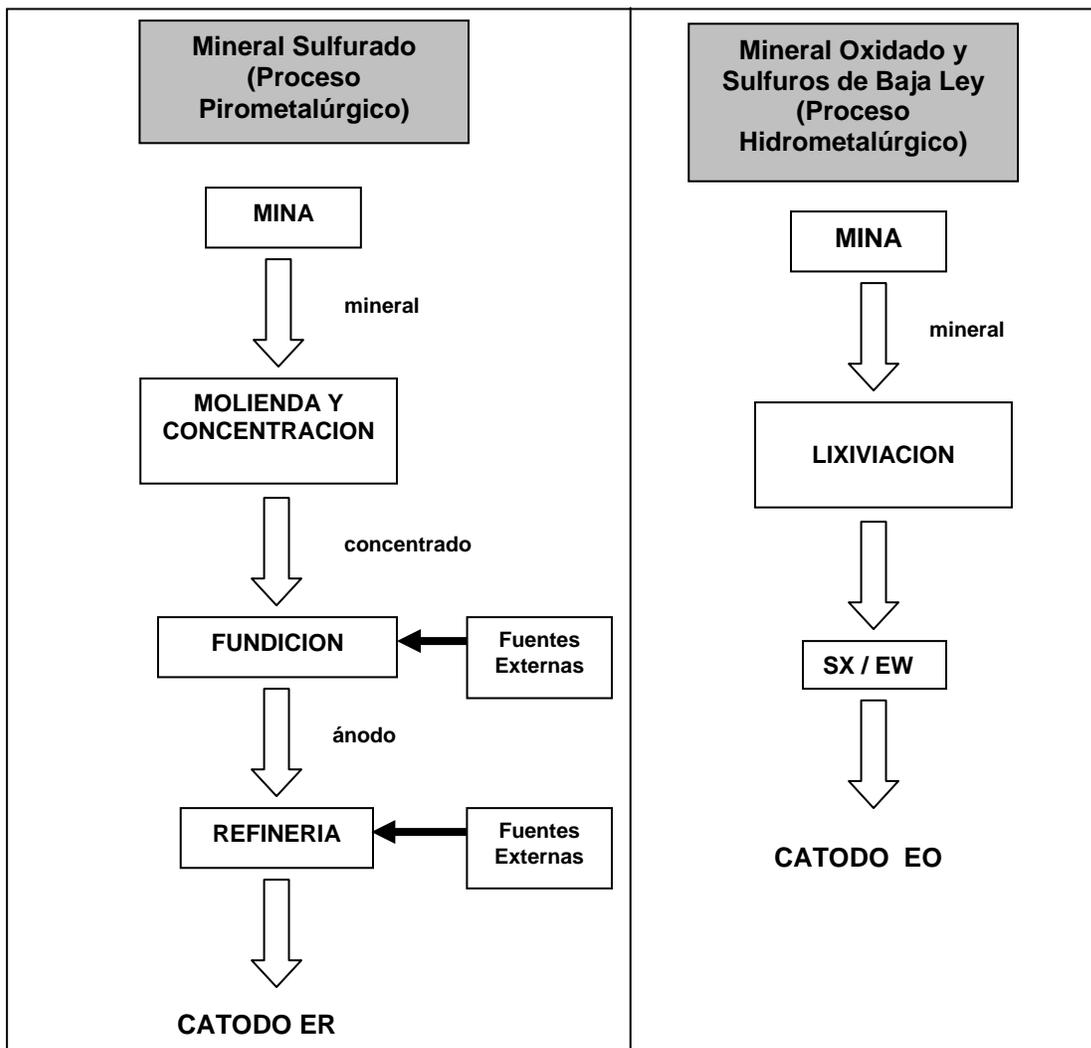
su producción se reportan aquí como parte del perfil de ciclo de vida de la fundición y, por lo tanto, de los ánodos y de los cátodos de cobre electro-refinados.

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 adicionalmente en Chile hasta la fecha es una práctica incipiente, que principalmente involucra contratación de mano de obra, por lo que no constituye una exclusión relevante para los resultados del estudio.

Los Diagramas de Flujo del procesamiento de minerales sulfurados y oxidados de cobre muestran los productos intermedios y finales. Tanto la fundición como la refinera electrolítica pueden recibir materiales de fuentes externas.

**Figura N° 1**  
**DIAGRAMAS DE FLUJO DEL PROCESAMIENTO DE MINERALES DE COBRE**



Fuente: Elaboración propia

## 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 1995-2004”, a través de una encuesta segmentada y específica, considerando las áreas, etapas y procesos característicos de cada una de las empresas, que se aplicó en el 1<sup>er</sup> semestre de 2005.

Los datos de uso de combustibles están separados por empresa, mina, proceso unitario (mina, concentradora, fundición, refinación 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).

### 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, leña, gas licuado y gas natural.

Para calcular la energía asociada al combustible consumido,  $E_f$ , se aplicó la siguiente fórmula:

$$E_f = \text{Consumo} * \text{Densidad} * \text{Poder Calorífico Inferior}$$

Para todos los combustibles se consideró que el poder calorífico inferior era el 95% del valor del poder calorífico superior<sup>13</sup> excepto para el gas licuado y el gas natural, en que se utilizó un 90%<sup>14</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 que se muestran en la Figura 1. 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 (Figura N° 1) en proporción a la fracción del consumo total de energía eléctrica (menos servicios y pérdidas) que correspondía a 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

<sup>13</sup> Balance Nacional de Energía, Comisión Nacional de Energía – Chile.

<sup>14</sup> Supuestos de la International Energy Agency.

operaciones. Esto se calculó como se indica en la sección 2.3.3. 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, **G<sub>f</sub>**, se usó la siguiente fórmula:

$$G_f = E_f * EF_f * FOC * (44/12)$$

Donde:

E<sub>f</sub> = energía calculada para ese consumo de combustible;

EF<sub>f</sub> = factor de emisión del combustible;

FOC = fracción de carbono oxidado; y

(44/12) = relación entre los pesos moleculares del CO<sub>2</sub> y el carbono.

Los valores usados para EF<sub>f</sub> y FOC se muestran en la siguiente tabla

**Tabla N° 2**  
**Factores de Emisión de Carbono y Fracción de Carbono Oxidado**  
**por Tipo de Combustible**

Tipo de Combustible	Factor de Emisión <b>EF<sub>f</sub></b> (TM C/TJ)	Fracción de carbono oxidado <b>FOC</b>
Diesel	20,2	0,99
Kerosene	19,6	0,99
Petróleo combustible	21,1	0,99
Nafta	20,0	0,99
Gasolina	18,9	0,99
Gas Licuado	17,2	0,995
Gas Natural	15,3	0,995
Carbón	25,8	0,98
Leña	29,9	0,98

**Fuente:** Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Workbook (Volume 2), Table 1 - 2 y Table 1 - 4.

Para calcular las emisiones de CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O asociadas al uso directo de cada tipo de combustible, en la siguiente fórmula general se utilizaron factores de emisión que son función del combustible y del tipo de uso que se le ha dado al combustible:

$$\text{Emisión} = \text{Energía} * \text{Factor de Emisión}$$

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.

**Tabla N° 3**  
**Factores de Emisión de CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O por tipo de combustible y uso**

Tipo de Combustible	Uso	Factor de Emisión (Kg/TJ)	
		CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O
Diesel	Vehículos pesados	4	2
Gasolina	Vehículos livianos	7,5	43
Petróleo	Secadores	1	0,6
Diesel	Caldera Industrial	0,2	0,4
Petróleo combustible	Caldera Industrial	3	0,3
Kerosene	Servicios	2	0,6
Gas Licuado	Servicios	2	0,6
Gas Natural	Caldera	1,4	0,1
Gas Natural	Secadores	1,1	0,1
Carbón	Caldera	1	1,6
Leña		30	4

Fuente: Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Reference Manual (Volume 3), Tables 1 – 7; 1 – 8; 1 – 15; 1 – 16; 1 – 17; 1 – 27; y 1 – 32.

### 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>15</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.

El procedimiento para calcular el consumo de energía indirecta y las emisiones de GEI no se describe en este documento, pero se siguió la metodología recomendada en “Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Reference Manual (Volume 3)”. La información necesaria para estos cálculos se obtuvo del sitio web de la Comisión Nacional de Energía de Chile ([www.cne.cl](http://www.cne.cl)), donde se entregan todos los datos respecto de la industria chilena del petróleo y gas para el período del estudio (1995-2004). 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 1995-2004 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.

La información necesaria para el cálculo de las emisiones de la industria de la energía eléctrica es:

- Estructura del Sistema abastecedor (SIC-SING)
- Consumos específicos de combustibles de las centrales generadoras (CEsp<sub>central</sub>)
- Generación anual bruta y total por central en GWh (GB<sub>central</sub>)
- Generación anual neta en GWh (GWh<sub>despachados</sub>)
- Pérdidas por Transmisión en GWh (GWh<sub>Pérdidos en Transmisión</sub>)

<sup>15</sup> Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Reference Manual (Volume 3), Page 1.1.

A partir de esta información se obtiene:

- Los consumos de combustibles por central (en unidades físicas). Así, para una central "j" que consume un combustible "i" cualquiera, el consumo de ese combustible en unidades físicas será:

$$CF_{\text{central } j}^{\text{combustible } i} = GB_{\text{central } j} \times CE_{\text{central } j}^{\text{combustible } i}$$

- El consumo total de combustible i del sistema generador :

$$(CF^{\text{combustible } i})_{\text{SISTEMA}} = \left( \sum_{j=1}^{N_{\text{Centrales}}} CF_{\text{central } j}^{\text{combustible } i} \right)_{\text{SISTEMA}}$$

- Conociendo los consumos totales de cada tipo de combustibles, se obtiene el consumo de energía total (CE) de cada uno de los sistemas de generación (SIC y SING).

$$(CE^{\text{combustible } i})_{\text{SISTEMA}} = (CF^{\text{combustible } i} \times PCI^{\text{combustible } i})_{\text{SISTEMA}}$$

donde

CE: Consumo de Energía [TJ]

CF: Consumo Físico

PCI: Poder Calorífico Inferior

- Las emisiones totales de GEI por sistema (SIC y SING) en toneladas de CO<sub>2</sub> se obtienen de la relación:

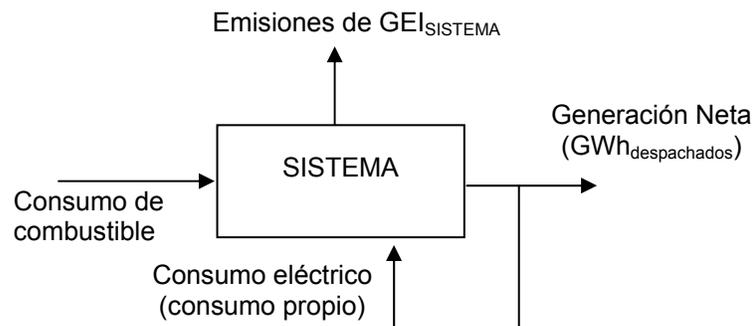
$$\text{Emisiones de GEI}_{\text{SISTEMA}} = \left( \sum_{i=1}^{N_{\text{combustible}}} CE^{\text{combustible } i} \times FE^{\text{combustible } i} \right)_{\text{SISTEMA}}$$

donde: FE es el Factor de Emisión de GEI

- El Factor de Emisión Unitario (FEU) para cada uno de los gases (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O) y para cada sistema (SIC y SING)

$$FEU_{\text{SISTEMA}} = \frac{\text{Emisiones de GEI}_{\text{SISTEMA}}}{GWh_{\text{despachados}}}$$

gráficamente,



Dado que este factor de emisión unitaria contabiliza lo que sucede dentro de las centrales, para calcular las emisiones indirectas producidas en las distintas faenas mineras, es necesario agregar al consumo eléctrico de la operación, las pérdidas producidas por la transmisión de la energía.

- La Fracción de Pérdidas por Transmisión (FPT) para cada sistema generador (SIC y SING) se obtiene de la relación:

$$FPT_{\text{SISTEMA}} = \frac{\text{GWh}_{\text{Perdidos en Transmisión}}}{\text{GWh}_{\text{despachados}}}$$

- En cada una de las faenas la Importación total de energía eléctrica será:

$$\text{Imp.Total} = \text{Imp.Neta} \times (1 + FPT_{\text{SISTEMA}})$$

$$\text{Imp.Neta} = \text{CBruto} + \text{Ventas} - \text{Autogeneración}$$

donde:

CBruto = Consumo Neto + Pérdidas de Distribución Interna

- Luego, las emisiones indirectas de GEI por consumo de electricidad a nivel de cada faena serán:

$$\text{Emisiones Ind.eléctricas} = \text{Imp.Total} \times FEU_{\text{SISTEMA}}$$

- En el caso de procesos o etapas dentro de la operación, se aplica la relación

$$\text{Emisiones}_{\text{Etapa}} = FEU_{\text{SISTEMA}} \cdot CE_{\text{Etapa}} \cdot (1 + FPT_{\text{SISTEMA}}) \cdot \chi_{\text{SISTEMA}}$$

donde:

$FEU_{\text{SISTEMA}}$  = Factor de Emisión Unitario del Sistema (SIC o SING)

$CE_{\text{Etapa}}$  = Consumo Eléctrico de la Etapa

$FPT_{\text{SISTEMA}}$  = Factor de Pérdidas por Transmisión del Sistema

Fracción de Energía Importada desde el Sistema  $\chi_{\text{SISTEMA}} =$

es decir,

$$\chi_{\text{SISTEMA}} = \frac{\text{Imp.Neta}}{\text{CBruto}}$$

Con la información anterior, los datos de consumo de electricidad de cada proceso unitario y los factores de emisión de los combustibles específicos para los procesos recomendados por el IPCC, se calcularon las emisiones de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O asociadas al consumo de energía eléctrica específico de cada operación. Estos valores, expresados en TM de CO<sub>2</sub> equivalentes, se sumaron a las emisiones indirectas asociadas al consumo de combustibles que se describió en la sección anterior, y en el estudio se informan como Emisiones Indirectas de GEI.

### 2.3.5 Demanda Unitaria de Energía y Carga 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 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).

Para el cálculo de DUEs y CUEs se definen los siguientes parámetros:

$E_i$  = Energía consumida o emisiones generadas por el proceso i en un año (Gigajoules o TM de CO<sub>2</sub> equivalentes)

$I_i$  = Toneladas de material de entrada rico en cobre consumido por el proceso i en un año (toneladas)

$O_i$  = Toneladas de material rico en cobre generadas por el proceso i en un año (toneladas)

$O_{if}$  = Toneladas de Cu fino en el material de salida rico en cobre generado por el proceso i en un año (toneladas)

En que, el subíndice i puede ser cualquiera de los siguientes: m (mina); c (planta concentradora); s (fundición); o r (refinería).

Con lo anterior se definen las siguientes relaciones:

$$R_i = \frac{I_i}{O_i} \quad (\text{sin unidades})$$

$$R_{if} = \frac{I_i}{O_{if}} \quad (\text{toneladas/tonelada de Cu fino})$$

$$Y_i = \frac{E_i}{O_i} \quad \text{Gigajoule/toneladas o TM de CO}_2 \text{ eq./toneladas}$$

$$Y_{if} = \frac{E_i}{O_{if}} \quad \text{GJ/tonelada de Cu fino; o TM de CO}_2 \text{ eq./tonelada de Cu fino}$$

Usando el consumo de energía en el parámetro  $E_i$  definido más arriba, se calculan de la siguiente manera las DUE para los diferentes productos:

$$DUE_{concentrado} = (Y_m \cdot R_{cf}) + Y_{cf} \quad \text{GJ/tonelada de Cu fino}$$

Para concentrado, las contribuciones de las unidades de proceso involucradas en la DUE total son:

Mina :  $Y_m \cdot R_{cf}$

Planta Concentradora :  $Y_{cf}$

$$DUE_{\text{ánodo}} = R_{sf} \cdot (Y_m \cdot R_c + Y_c) + Y_{sf} \quad \text{GJ/tonelada de Cu fino}$$

Para ánodos, las contribuciones de las unidades de proceso involucradas en la DUE total son:

$$\text{Mina} \quad \quad \quad : Y_m \cdot R_c \cdot R_{sf}$$

$$\text{Planta Concentradora} \quad : Y_c \cdot R_{sf}$$

$$\text{Fundición} \quad \quad \quad : Y_{sf}$$

$$DUE_{\text{cátodo}} = R_{rf} \cdot [R_s \cdot (Y_m \cdot R_c + Y_c) + Y_s] + Y_{rf} \quad \text{GJ/tonelada de Cu fino}$$

Para cátodos ER, las contribuciones de las unidades de proceso involucradas en la DUE total son:

$$\text{Mina} \quad \quad \quad : Y_m \cdot R_c \cdot R_s \cdot R_{rf}$$

$$\text{Planta concentradora} \quad : Y_c \cdot R_s \cdot R_{rf}$$

$$\text{Fundición} \quad \quad \quad : Y_s \cdot R_{rf}$$

$$\text{Refinería} \quad \quad \quad : Y_{rf}$$

Del mismo modo, las respectivas CUE se calcularon usando los datos de emisiones de CO<sub>2</sub> equivalentes para el parámetro  $E_i$  definido más arriba, y las unidades en ese caso son TM de CO<sub>2</sub> equivalente / tonelada de Cu fino.

### 2.3.6 Concentrados y Anodos 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, Cochilco disponía de información respecto de las operaciones de Codelco y el resto de las empresas proporcionaron los antecedentes de sus respectivas faenas.

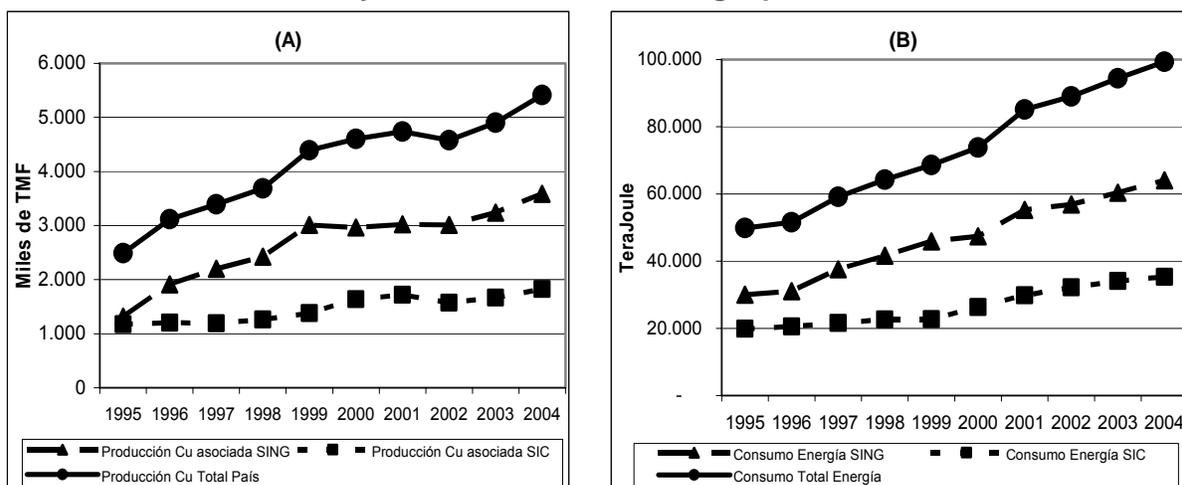
Es importante destacar que, como se señaló anteriormente, este estudio utiliza la información proporcionada por 30 faenas mineras, principalmente de la Gran y Mediana Minería, por lo que, en aquellos casos en que parte de la alimentación a una fundición provenía de una faena de la pequeña minería se utilizó la mejor información disponible.

### III ANALISIS DE RESULTADOS

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

La Figura N° 2(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, con la respectiva cartera de productos comerciales asociada a cada año. El país incrementó su producción anual de 2,49 a 5,41 millones de toneladas de cobre fino en el período, que significa un crecimiento de 117,5% entre 1995 y 2004. La producción de cobre asociada al SING aumentó en un 172,7%, mientras que la asociada al SIC sólo lo hizo en un 55,7%.

**Figura N° 2**  
**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° 2(B), el consumo de energía para los años en análisis presenta una tendencia similar a la de la producción de cobre. En las faenas asociadas al SING el consumo de energía creció, entre 1995 y 2004 en un 113,8%, valor que es inferior al incremento de producción de cobre. En cambio, en el SIC el consumo energético aumentó en un 77,2%, mientras la producción lo hacía en sólo un 55,7%. El consumo total creció en 99,2%, valor que es inferior al aumento de producción de cobre del país, lo que, en términos generales, sin considerar la cartera de productos comerciales, estaría reflejando un uso más eficiente de la energía en la minería del cobre, en particular en las faenas asociadas al SING.

**Tabla N° 4**  
**Consumo Total de Energía y Participación de Energía Directa**

	Consumo Anual de Energía (TJ)				% Energía Directa			
	1995	2000	2003	2004	1995	2000	2003	2004
SING	29.953	47.433	60.316	64.050	59,3	50,7	46,4	46,2
SIC	19.893	26.347	34.078	35.244	56,7	42,9	38,4	36,4
TOTAL	49.845	73.780	94.395	99.294	58,2	47,9	43,5	42,7

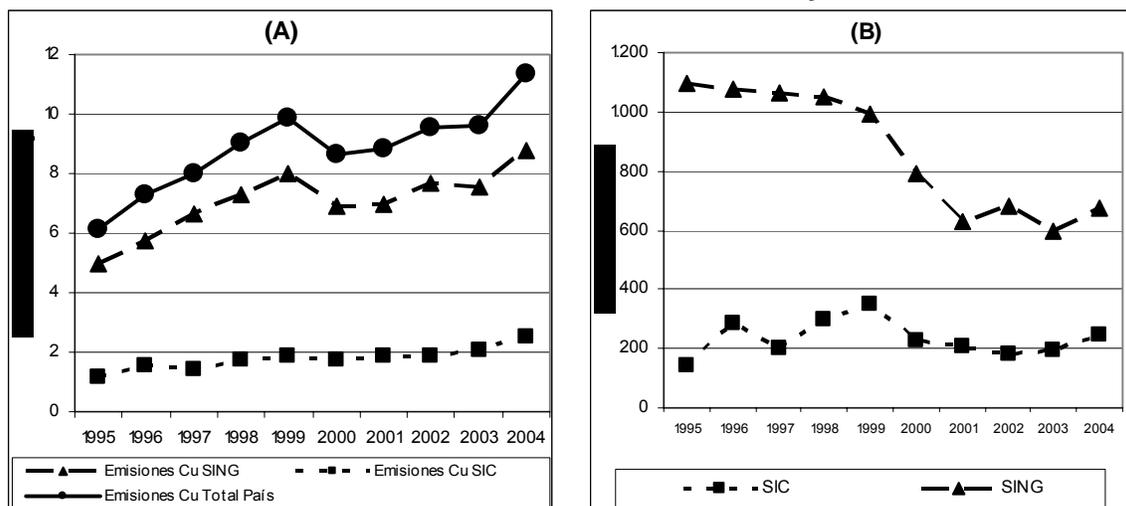
Fuente: Elaborado por la Comisión Chilena del Cobre en base a información de las empresas.

En el año 2004 la minería del cobre que se abastece de energía eléctrica del SING produjo el 66,2% del cobre del país en sus distintas formas comerciales y consumió el 64,5% del total de la energía. La fracción de la energía total consumida por la minería del cobre que corresponde a uso de energía directa disminuyó de 58,2% en 1995 a 42,7% en el 2004.

La fracción de la energía total consumida por los procesos relacionados con minerales sulfurados disminuyó de 84,4% en 1995 a 64,6% en 2004.

En lo que dice relación con las emisiones de GEI del sector minería del cobre la Figura N° 3(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 1995 y 2004 las emisiones asociadas al SIC se incrementan en 113,1%, mientras que la producción de cobre que se abastece de ese sistema aumenta sólo un 55,7%. Por su parte, las emisiones asociadas al SING crecen en un 78,4%, mientras que la respectiva producción se incrementa en un 172,7%. Las emisiones totales del sector en el año 2004 alcanzaron a 11,35 millones de TM CO<sub>2</sub> equivalente.

**Figura N° 3**  
**Emisiones de GEI de la Minería del Cobre según Sistema de Generación Eléctrica y Perfil de Emisiones Unitarias del SING y SIC**

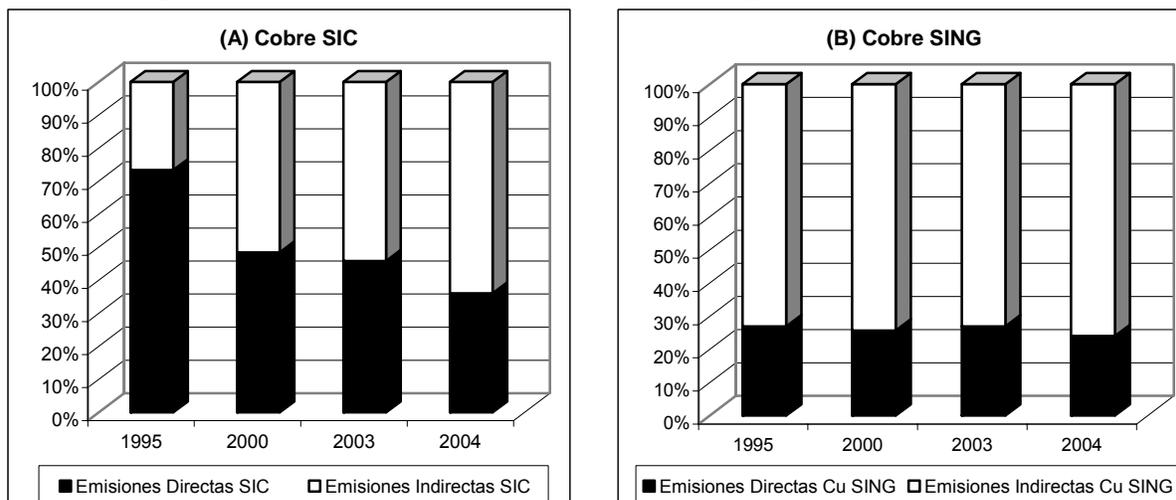


Fuente: Elaborado por la Comisión Chilena del Cobre en base a información de las empresas, la CNE y el CDEC.

Lo anterior se debe fundamentalmente a los cambios en las matrices energéticas de los sistemas de generación eléctrica, que se pueden observar en la Figura 3(B). Entre 1995 y 2004 los coeficientes unitarios de emisión del SIC aumentan en un 72,7%, influidos principalmente por el crecimiento en la generación térmica del SIC, que pasa de 22% en 1995 a 40,5% en 2004. Por su parte el SING, disminuye sus coeficientes unitarios en un 38,1%, producto de cambios en los combustibles utilizados. En el año 1995 el principal combustible era carbón, mientras que en el 2004 las centrales generadoras utilizaron principalmente gas natural. La crisis del gas natural que se produjo en los años siguientes significará necesariamente un aumento de los coeficientes unitarios del SING, ya que las centrales generadoras se han visto obligadas a reemplazar el gas por carbón y diesel.

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° 3(B) indican tres importantes características de relevancia para este estudio. Primero, el SING emite entre 2,7 y 7,6 veces más toneladas de CO<sub>2</sub> por GWh generado que el SIC. Segundo, el SING ha disminuido sostenidamente sus emisiones de CO<sub>2</sub> por GWh desde mediados de la década del 90, mostrando un ligero incremento en el último año debido a los problemas de abastecimiento de gas natural, que han significado un cambio en los tipos de combustible utilizados para la generación eléctrica. Finalmente, el SIC muestra una tendencia creciente en las emisiones, con leves alzas y bajas temporales.

**Figura N° 4**  
**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 4 (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 73,3% a un 36%, mientras las indirectas (producto del consumo de energía eléctrica abastecida por el SIC) se incrementan de un 26,7% a un 64%. 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.

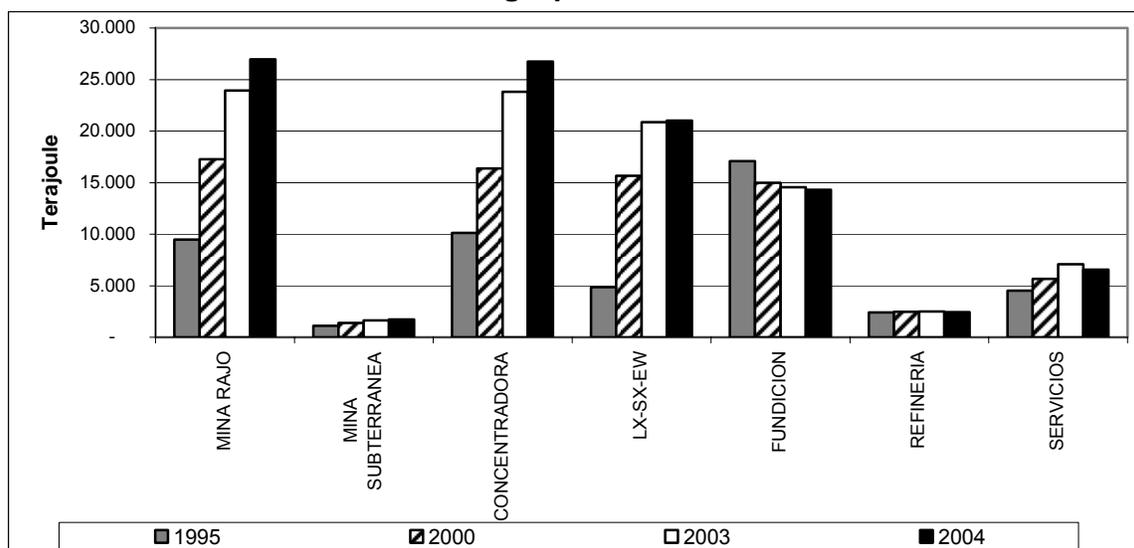
Por su parte, en el período, la proporción de las emisiones generadas por la producción de cobre asociada al SING (Figura 4(B)) se mantiene relativamente estable, las directas bajan de 27% a 24%, mientras las indirectas suben de 73% a 76%, influenciadas por las mayores emisiones de GEI asociadas al SING.

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

### 3.2.1 Consumo de Energía

En la Figura N° 5 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° 5**  
**Consumo de Energía por Areas de Producción**



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

En el año 1995 las minas rajo consumieron un 19,1% de la energía total, incrementando su participación en el año 2004 a 27%, lo que se explica fundamentalmente por la entrada en operación de una serie de 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 disminuyen su participación de un 2,2% en 1995 a un 1,7% en el 2004, principalmente por el cierre de algunas de ellas.

La concentradora aumenta su participación en el consumo de energía de 20,4% a 26,8% en el 2004, lo que se debe a que hay un aumento de volumen del mineral procesado y a 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) incrementa su participación de 9,8% en 1995 a 21,1% en el 2004, lo anterior debido a que la producción de cobre proveniente de este tipo de mineral creció en un 339% entre 1995 y 2004.

La fundición de concentrados de cobre tenía en 1995 una participación de 34,5% en el consumo total de energía, la que disminuye a 14,3% en el 2004, producto de los cambios tecnológicos impulsados por medidas ambientales que se detallaron anteriormente.

La refinería electrolítica, si bien en valores absolutos mantiene un consumo de energía bastante estable en el período, disminuye su participación de un 4,8% a 2,4%.

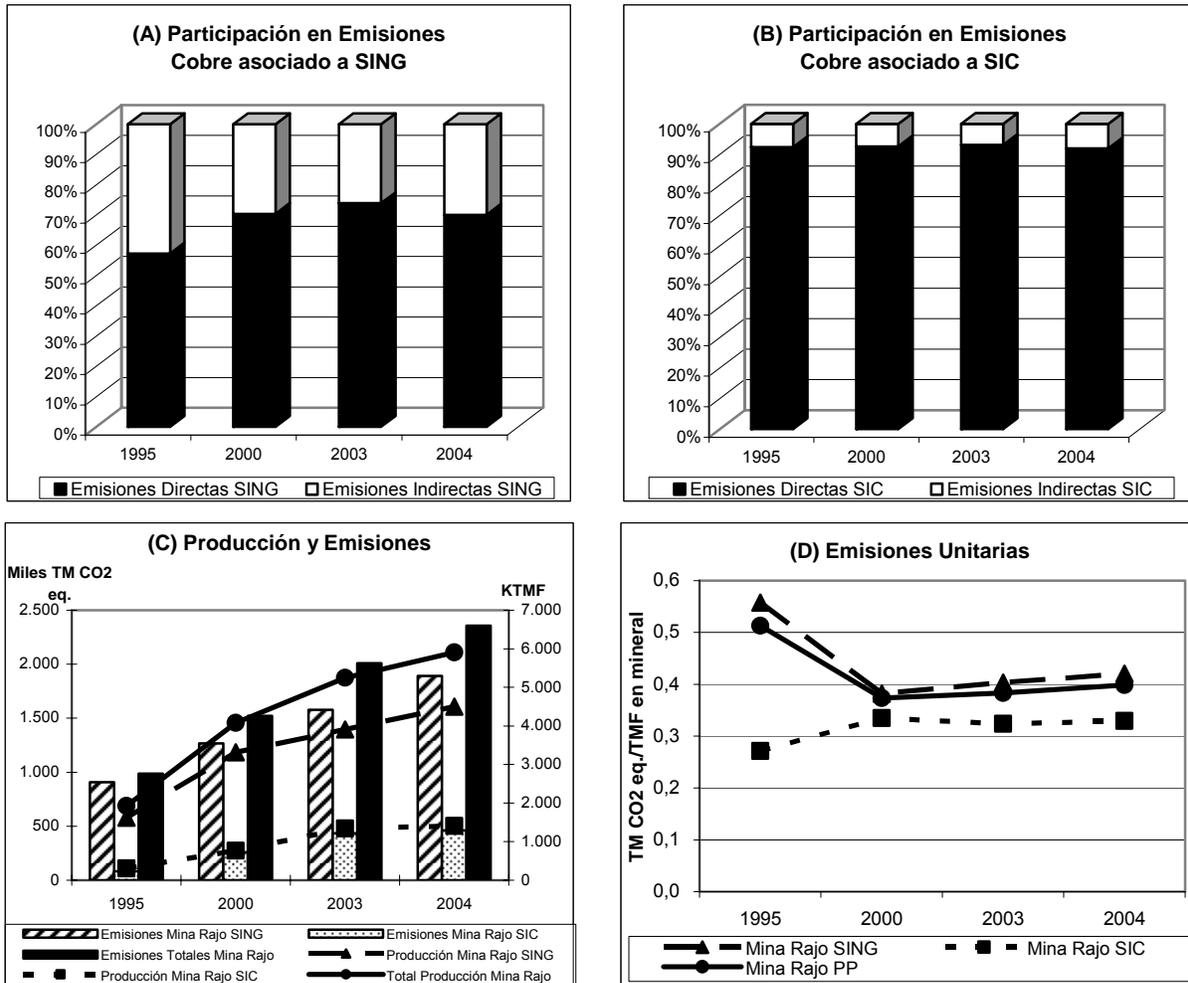
El área de servicios a la producción baja su participación en el consumo total de energía de un 9,1% a 6,6% entre 1995 y el 2004, debido principalmente a la tendencia creciente a externalizar este tipo de servicios.

### 3.2.2 Emisiones de GEI por Areas

#### 3.2.2.1 Area Mina Rajo

Las emisiones de GEI en el área mina rajo se incrementan en un 138% en el período, mientras la producción de cobre fino de mina aumenta en 206%. Su participación en las emisiones totales aumenta de 16,1% a 20,8%.

**Figura N° 6**  
**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° 6(C)) crecen entre 1995 y 2004 en un 109%, mientras la producción lo hace en un 177%. Las emisiones directas aumentan su participación a un 70% (Figura N° 6 (A)), producto de un mayor uso de combustibles en la explotación minera.

Por su parte, las emisiones de las minas rajo asociadas al SIC (Figura N° 6(C)) se incrementan en el período en un 464%, mientras la producción de cobre fino de mina crece sólo un 365%. La participación de las emisiones directas se mantiene estable en torno al 92% (Figura N° 6(B)).

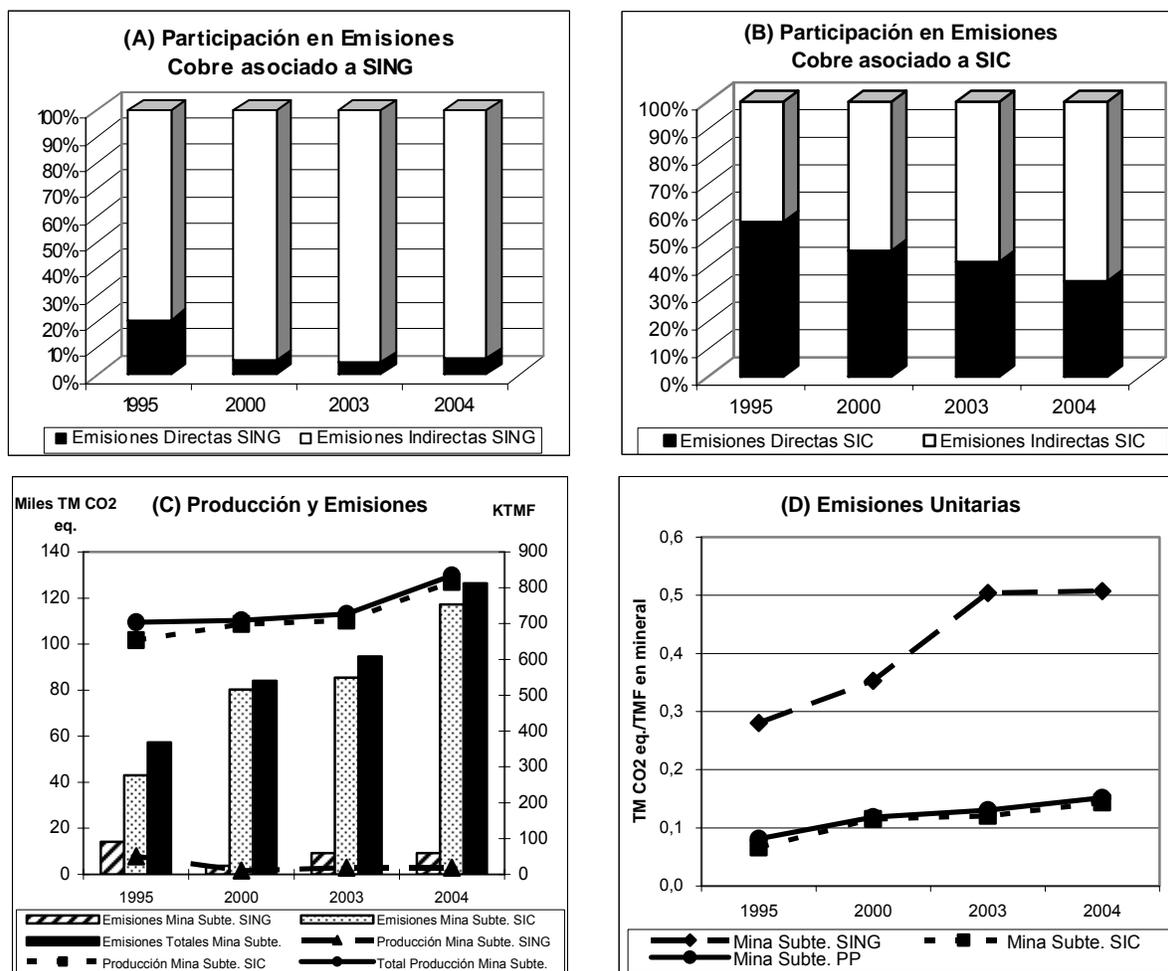
En la Figura N° 6(D) se observa que la Carga de Emisión (CUE) de las minas rajo SING disminuye alrededor de un 25% entre 1995 y 2004, mientras que la de las minas rajo del SIC aumenta en un 21%. Debido a que la producción de cobre de mina rajo proviene mayoritariamente (76%) de minas

asociadas al SING, los promedios ponderados país de la CUE para mina rajo siguen la misma tendencia de aquellas de las minas rajo SING, con un valor de CUE para el año 2004 de 0,40 TM CO<sub>2</sub> / TMF en mineral.

### 3.2.2.2 Area Mina Subterránea

En el área mina subterránea las emisiones de GEI se incrementan en un 120% en el período y la producción de cobre fino crece sólo un 19%. Su participación en las emisiones totales se mantiene relativamente estable en el período en torno a 1%.

**Figura N° 7**  
**AREA MINA SUBTERRANEA**



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

La producción de cobre de mina subterránea proviene mayoritariamente (97,8%) de minas asociadas al SIC.

Las emisiones totales de las minas subterráneas asociadas al SING (Figura N° 7(C)) disminuyen en un 35% en el período, y la producción también se reduce en un 64% (cierre de minas). Las emisiones directas disminuyen su participación en las emisiones totales del área mina del SING a un 6% (Figura N° 7(A)).

Por su parte, las emisiones de las minas subterráneas asociadas al SIC (Figura N° 7(C)) se incrementan en el período en un 172%, mientras la producción de cobre fino de este tipo de mina

en el SIC crece sólo un 25%. La participación de las emisiones directas se reduce de 56% a 35% (Figura N° 7(B)).

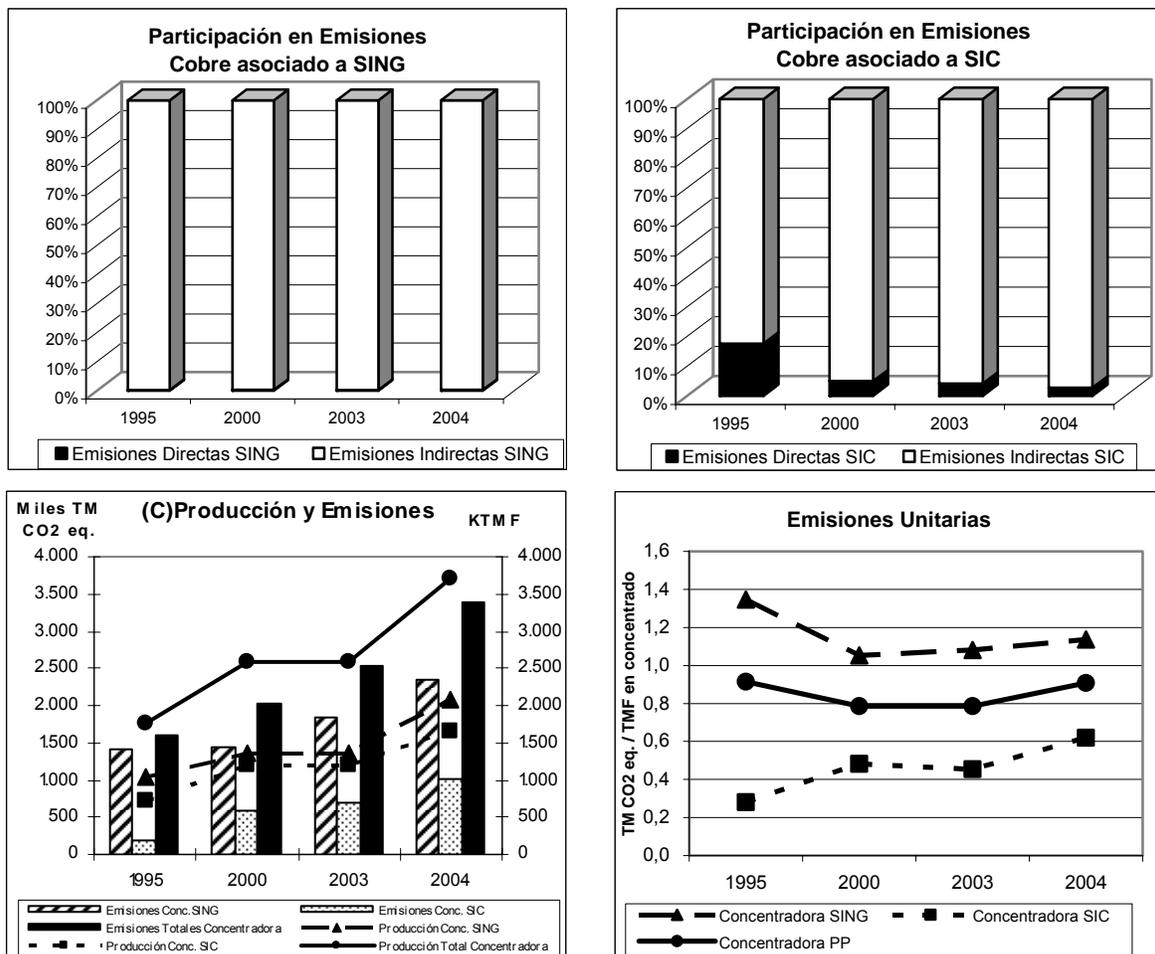
La Figura N° 7(D) muestra que la Carga Unitaria de Emisión (CUE) de las minas subterráneas SING aumenta alrededor de un 81% entre 1995 y 2004, mientras que la de las minas subterráneas asociadas al SIC aumenta en 118%. Los promedios ponderados país de la CUE para mina subterránea siguen la misma tendencia 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 2004 de 0,15 TM CO<sub>2</sub> / TMF en mineral.

### 3.2.2.3 Area 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.

Las emisiones totales de GEI del área concentradora se incrementan en un 109% entre 1995 y el 2004, mientras que el mineral procesado en las plantas aumenta en 111% (Figura N° 8(C)). Su participación en las emisiones totales de la minería del cobre, con ligeras fluctuaciones, se mantiene en torno al 27%.

**Figura N° 8  
AREA CONCENTRADORA**



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

Las emisiones totales de las plantas concentradoras que se abastecen de energía eléctrica del SING aumentan en un 67%, mientras el procesamiento de mineral lo hace en un 98% (Figura N° 8 (C)). Las emisiones directas son irrelevantes, ya que las indirectas constituyen el 99,7% de las emisiones durante todo el período (Figura N° 8(A)).

En el caso de las plantas concentradoras que se abastecen del SIC, las emisiones totales aumentan en 408% y el mineral tratado se incrementa sólo en 130% (Figura N° 8(C)). Las emisiones directas bajan en un 19%, en cambio las indirectas suben en 500%. Lo anterior se debe al fuerte 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 17,6% a un 2,8% (Figura N° 8(B)).

Las plantas concentradoras del SING disminuyen su participación en el total de emisiones del área desde un 87,6% a un 70%, en circunstancias que ellas procesan el 56% del total del mineral tratado, lo que refleja los altos coeficientes unitarios de emisión de este sistema de generación eléctrica.

La Carga de Emisión (CUE) (Figura N°8(D)) de las concentradoras del SING disminuye en un 16% entre 1995 y 2004, mientras que la de las plantas asociadas al SIC aumenta en 121%. Los promedios ponderados país de la CUE para plantas concentradoras se mantienen bastante estables en el período, con un valor para el año 2004 de 0,91 TM CO<sub>2</sub> / TMF en concentrado.

#### **3.2.2.4 Area Fundición**

El área de fundición de concentrados de cobre, con una producción que se mantiene bastante estable en el período (incremento de 22%), disminuye su participación en las emisiones totales de la minería del cobre desde un 28% en 1995 a un 12% en el 2004. Las emisiones del área se reducen en un 21,4% en el período por las razones que se han expuesto anteriormente (Figura N° 9(C)).

Las emisiones totales de las fundiciones asociadas al SING disminuyen en un 20% en el período (Figura N° 9(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 64% a un 74% (Figura N° 9(A)).

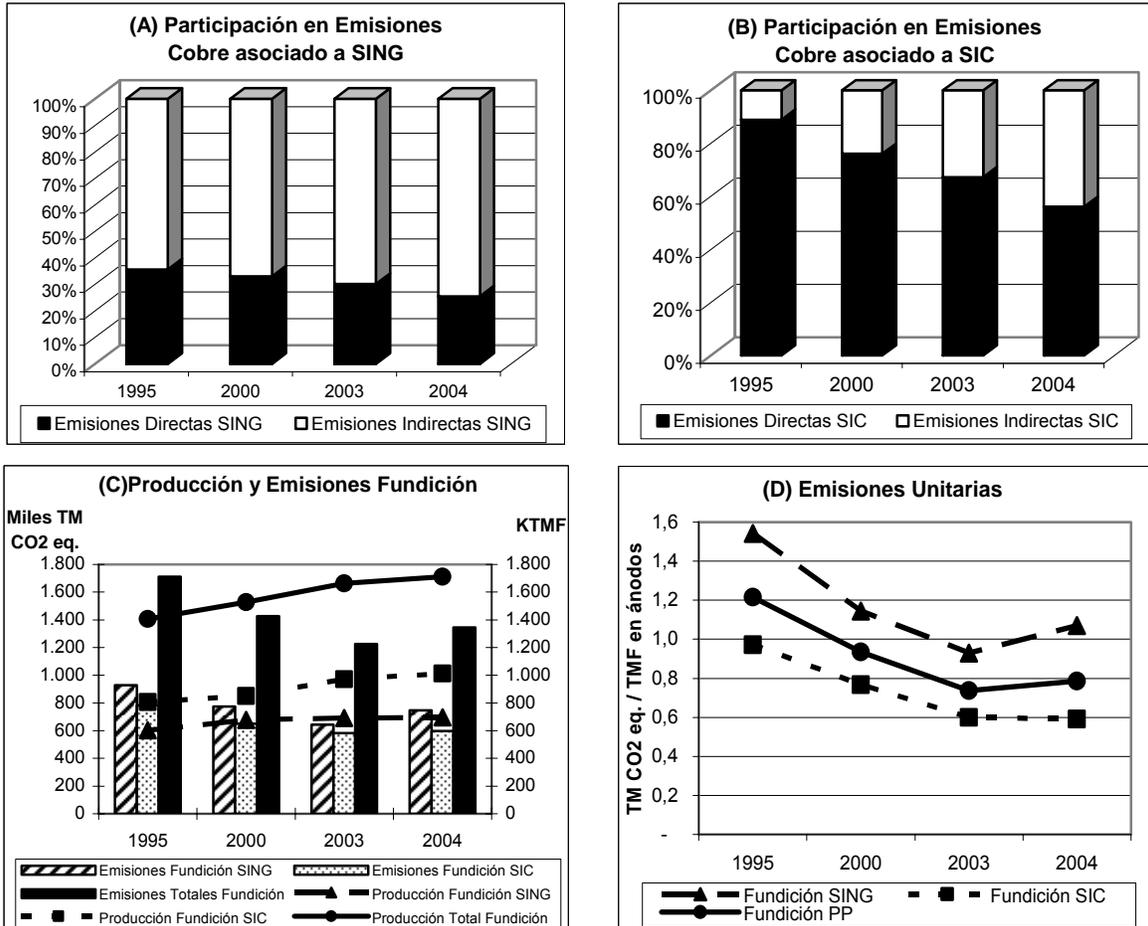
Las emisiones totales de las fundiciones del SIC disminuyen en 24% (Figura N° 9(C)), y la participación de las emisiones directas disminuye de 89% a 56% en el período, lo que es un resultado del cambio tecnológico que han experimentado las fundiciones entre 1995 y 2004 (Figura N° 9(B)).

Debido a que en el período no se han instalado nuevas fundiciones y que las existentes no han experimentado grandes cambios de capacidad de procesamiento, la contribución de las fundiciones SING y SIC al total de emisiones del área se mantiene bastante estable, 55% y 45% respectivamente.

En el promedio ponderado país de las emisiones de las fundiciones, las emisiones directas disminuyen de 60% a 39% en el período, debido al cambio tecnológico en el área de fusión de concentrados y a la instalación de sistemas de captación y abatimiento de gases.

La Carga de Emisión (CUE) (Figura N°9(D)) de las fundiciones del SING disminuye en un 31% entre 1995 y 2004, y la de las fundiciones asociadas al SIC se reduce en un 39%, lo que hace que los promedios ponderados país de la CUE para las fundiciones disminuyan en un 35%, alcanzando en el año 2004 un valor de 0,79 TM CO<sub>2</sub> equivalente / TMF en ánodos.

**Figura N° 9**  
**AREA FUNDICIÓN**



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

### 3.2.2.5 Area Refinería Electrolítica

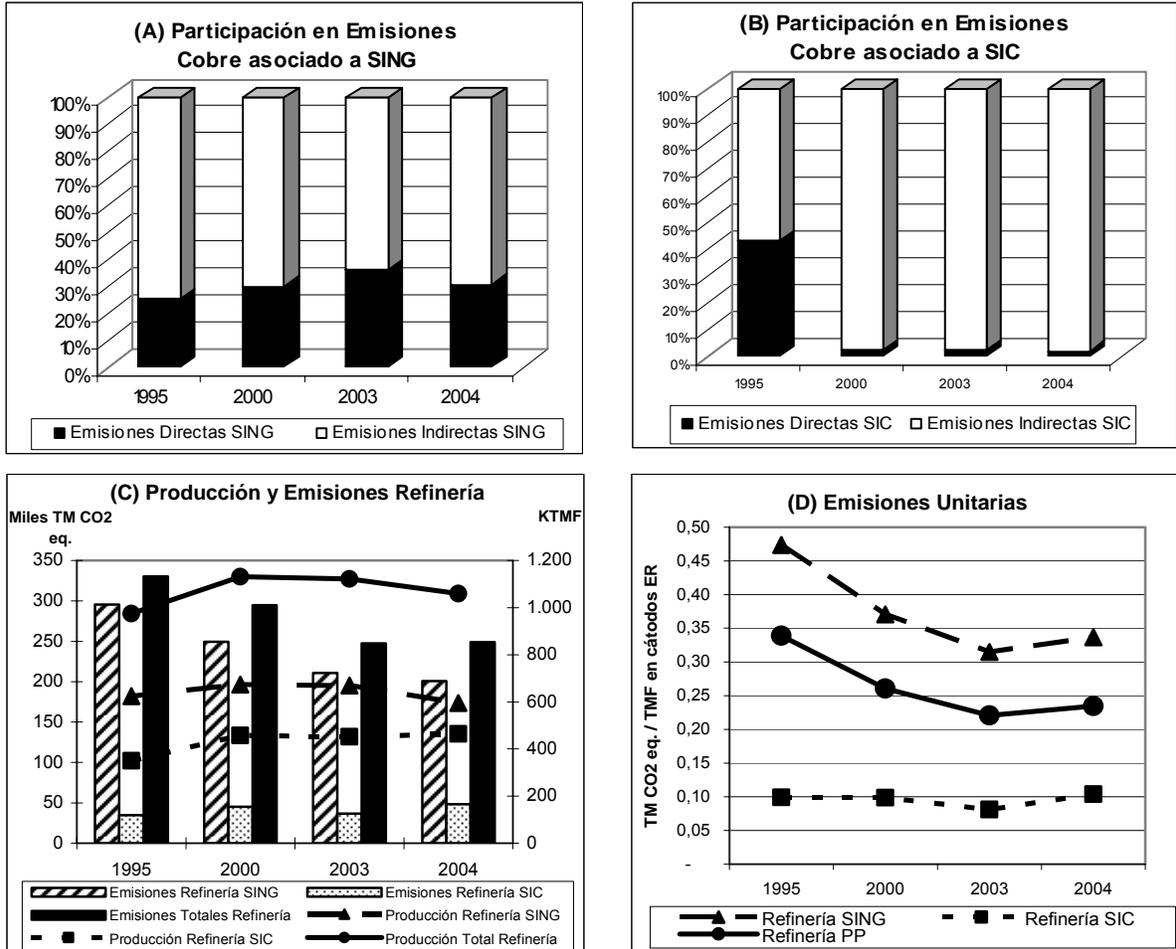
El área de refinación electrolítica, después del área mina subterránea, es la que muestra una menor participación en el total de emisiones de la minería del cobre (2,2% en el año 2004). Las emisiones de las refinerías electrolíticas del país se reducen entre 1995 y el 2004 en un 24,6%, mientras la producción de cátodos electrorefinados (ER) se mantiene relativamente estable (crece 9%) (Figura N° 10(C)).

Las emisiones totales del área refinación electrolítica que recibe abastecimiento eléctrico del SING se reducen entre 1995 y 2004 en un 32% (Figura N° 10(C)), producto fundamentalmente de una reducción similar de los coeficientes unitarios de emisión del sistema de generación eléctrica SING.

En lo que se refiere a las emisiones totales de las refinerías electrolíticas asociadas al SIC, mientras su producción se incrementa en un 32%, éstas aumentan sus emisiones en un 39%, impulsadas por los valores crecientes de los coeficientes unitarios de emisión del SIC (Figura N° 10(C)).

Las emisiones directas del área refinería del SING aumentan su participación de 25% a 31%, mientras que las del SIC disminuyen de 43% a 2% en el período (Figuras N° 10 (A) y (B)). En el año 2004 la refinación electrolítica en el SING contribuye con un 81% al total de emisiones del área.

**Figura N° 10**  
**AREA REFINERIA ELECTROLITICA**



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

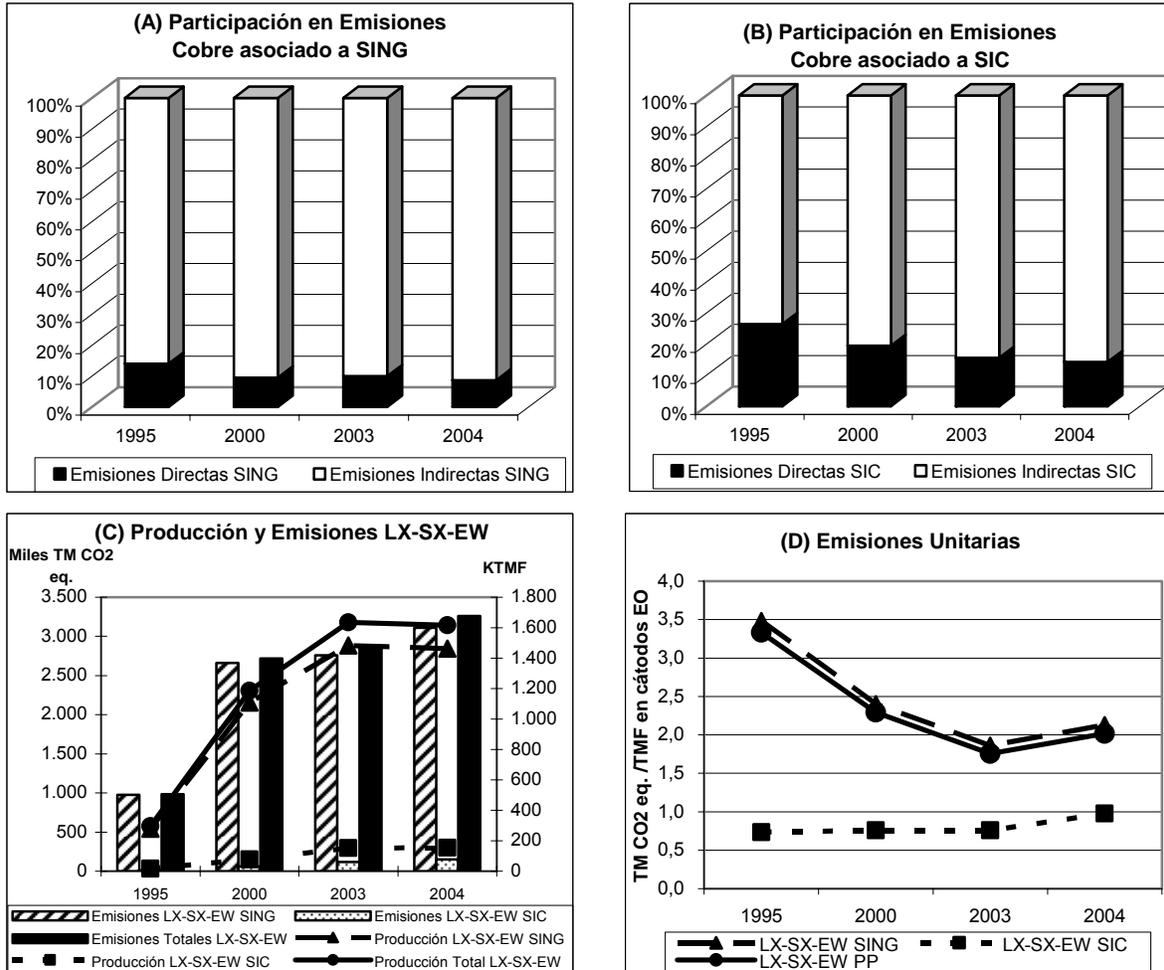
La Carga de Emisión (CUE) (Figura N°10(D)) de la refinación electrolítica en el SING disminuye en un 29% entre 1995 y 2004, y la de las refinerías asociadas al SIC se incrementa en un 5%, lo que hace que los promedios ponderados país de la CUE para las refinerías disminuyan, alcanzando en el año 2004 un valor de 0,23 TM CO<sub>2</sub> equivalente / TMF en cátodos ER.

### 3.2.2.6 Area Lixiviación – Extracción por Solvente - Electrodeposición

El área de tratamiento de minerales lixiviables aumenta sus emisiones en el período en un 231% con lo que su participación en las emisiones totales de la minería del cobre se incrementa de un 16% en 1995 a un 29% en el 2004, lo que se explica principalmente por el fuerte aumento de la producción de cobre proveniente de este tipo de minerales, que aumenta entre 1995 y 2004 en un 339% (Figura N° 11(C)).

Las emisiones totales de las faenas que reciben abastecimiento eléctrico del SING y que tratan este tipo de minerales aumentan en un 219%, mientras que las faenas asociadas al SIC incrementan sus emisiones en 1.191%, y la producción en esa área crece en más de 850%.

**Figura N° 11**  
**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 de alrededor del 15% (Figura N° 11 (A) y (B)). En el promedio ponderado país las emisiones indirectas se mantienen en el período en valores cercanos al 90% .

Es importante destacar que más del 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 98,8% y 95,4%.

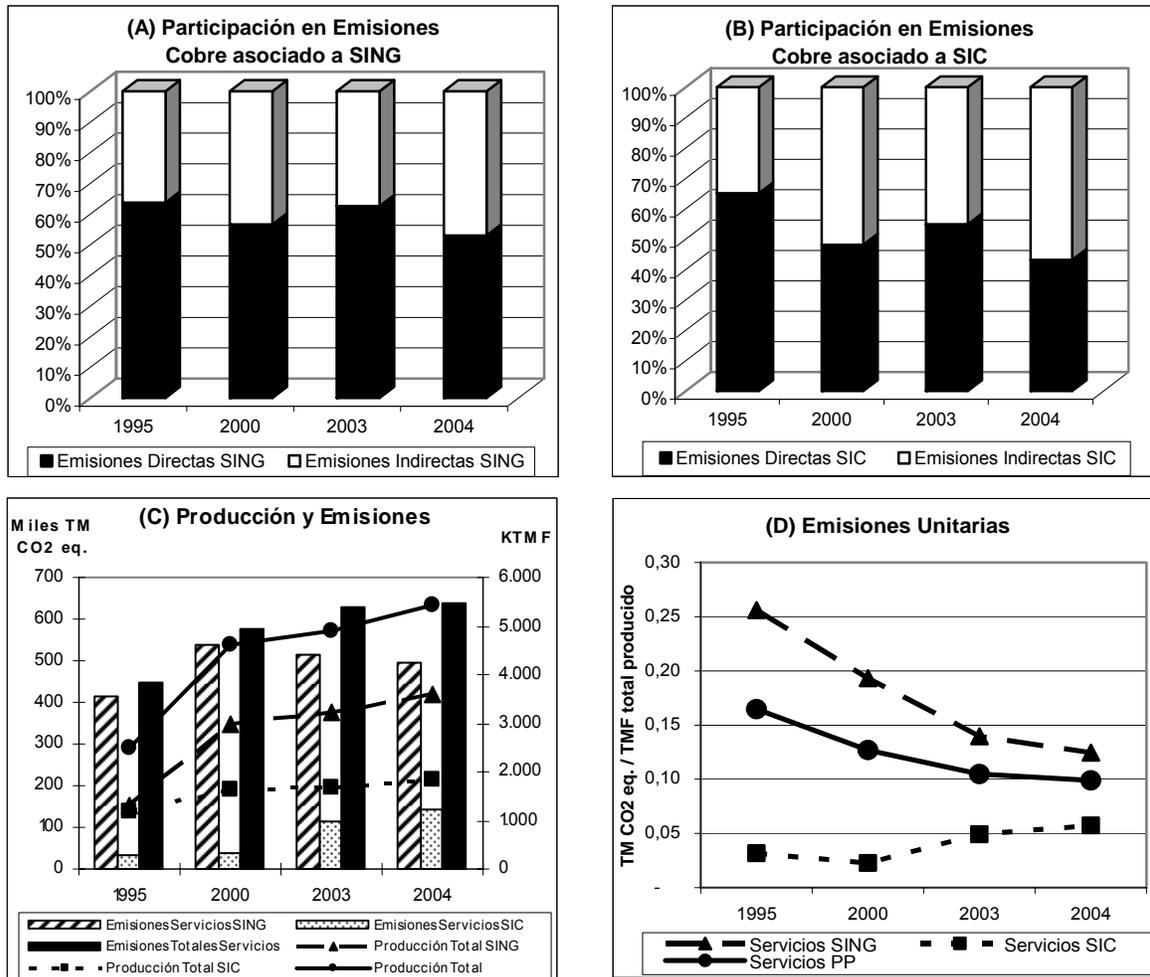
En la Figura N° 11(D) se puede observar que la CUE promedio ponderado de las faenas asociadas al SIC muestra una tendencia creciente en el período (33%), mientras la CUE de las operaciones que se abastecen del SING muestran una tendencia decreciente, con un ligero repunte el último año, similar a la que muestran los coeficientes unitarios de emisión del SING (ver Figura N° 3(B)). En el año 2004 la CUE del área de tratamiento de minerales lixiviables alcanza un valor de 2,02 TM CO<sub>2</sub> equivalente / TMF en cátodos electroobtenidos (EO).

### 3.2.2.7 Area 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 7,3% en 1995 a un 5,6% en el 2004.

Las emisiones totales del área servicios de las faenas que se abastecen del SING crecen en el período en un 21% (Figura N° 12(C)) y la participación de las emisiones directas disminuye desde un 64% a un 53% (Figura N° 12(A)).

**Figura N° 12**  
**AREA SERVICIOS A LA PRODUCCION**



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

Para las faenas mineras que reciben abastecimiento eléctrico del SIC, las emisiones totales del área servicios a la producción se incrementan en un 301%. Las emisiones directas, producto del consumo de combustibles fósiles, disminuyen su participación en las emisiones totales del área servicios de las faenas asociadas al SIC desde un 65% en 1995 a un 43% en el 2004 (Figura N° 12(B)).

En el promedio ponderado país las emisiones directas del área servicios bajan su participación en el período de un 64% a un 51%.

El área servicios a la producción de las faenas mineras asociadas al SING contribuyó en el año 1995 con un 92% del total de emisiones del área, mientras que en el año 2004 la participación descendió a un 78%.

La CUE del área servicios a la producción de las operaciones mineras asociadas al SING disminuye en un 51% en el período, mientras que la CUE de aquellas del SIC aumenta en un 81%. En el año 2004 la CUE del área servicios alcanza un valor promedio ponderado país de 0,10 TM CO<sub>2</sub> equivalente / TMF total producido (Figura N° 12(D)).

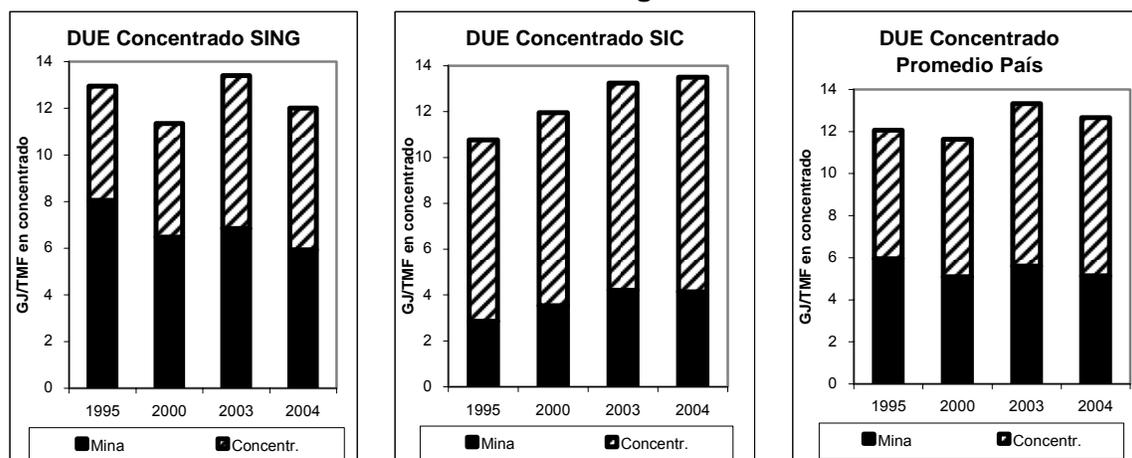
### 3.3 Demandas Unitarias de Energía y Cargas Unitarias de Emisión por Productos

Los valores de Demanda Unitaria de Energía (DUE) y Carga Unitaria de Emisión (CUE), calculados como se describe en el punto 2.3.4, 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 los 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

En Chile se producen concentrados de cobre a partir de mineral sulfurado, tanto en el Norte Grande, que se abastece de energía eléctrica del SING, como en la zona norte y central que es abastecida por el SIC. La Figura N° 13 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 13,5 GJ/TMF para los concentrados producidos en el SIC el año 2004, y el menor valor es de 10,8 GJ/TMF para estos mismos concentrados en el año 1995, lo que significa que, en el período, la DUE de los concentrados SIC se incrementó en un 25,4%. Los concentrados del SING presentan algunas fluctuaciones, con una reducción de la DUE en el período de 7,3%.

**Figura N° 13**  
**Demanda Unitaria de Energía Concentrados**

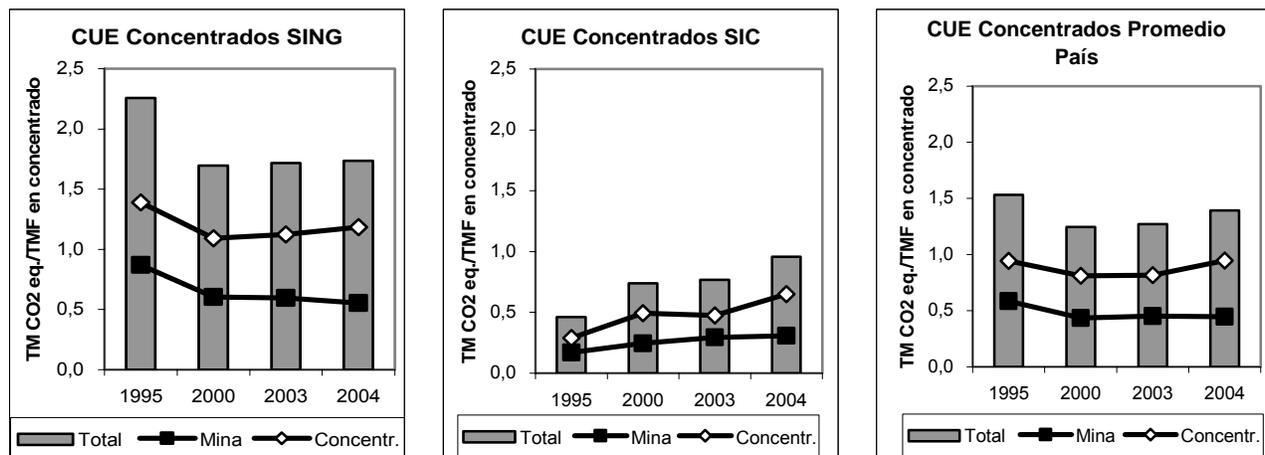


Fuente: Elaborado por la Comisión Chilena del Cobre en base a información de las empresas.

En los concentrados del SING, inicialmente en el año 1995, la contribución de la mina al consumo de energía era de 62%, reduciendo su participación en el año 2004 a un 49%. Para los concentrados del SIC, la participación de la concentradora en el consumo de energía se mantiene relativamente estable en torno al 70%, la mayor parte de la cual corresponde a energía indirecta, esto es energía eléctrica abastecida por el SIC.

En el año 2004 la DUE promedio ponderado país de los concentrados alcanza un valor de 12,67 GigaJoule /TMF en concentrados que es un 5% superior al valor del año 1995.

**Figura N° 14**  
**Carga Unitaria de Emisión Concentrados**



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

En relación con la Carga Unitaria de Emisión (CUE) de los concentrados, cuya evolución se muestra en la Figura N° 14, los valores más altos se observaron en los concentrados producidos por las operaciones mineras abastecidas por el SING, con un máximo de 2,26 TM de CO<sub>2</sub> equivalente por TMF en 1995, que ha disminuido a 1,74 toneladas en el 2004 (reducción de 23%), a pesar que los valores de DUE se han mantenido con ligeras variaciones en el período. Lo anterior se debe a que los coeficientes unitarios de emisión del SING disminuyeron entre 1995 y 2004 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 dos y cinco veces más altas que las de los concentrados del SIC, debido a las emisiones más altas del SING, que es el sistema que abastece de energía eléctrica a la parte norte de Chile. Del mismo modo, la reducción en las emisiones en los últimos años del período reflejan la caída en las emisiones del SING (ver Figura N° 3(B)). Para la mayoría de los años en los concentrados del SING, entre el 62% y el 68% de la CUE es aportada por la concentradora.

Las CUEs de los concentrados producidos con energía eléctrica del SIC se incrementan en un 108%, alcanzando en el año 2004 un valor de 0,96 TM de CO<sub>2</sub> equivalente por TMF. Esto se debe a que el perfil de emisiones del SIC experimenta un crecimiento de 73% en el período por una reducción en la generación hidroeléctrica. Al igual que en los concentrados del SING, la contribución de la planta concentradora fluctúa entre 62% y 68%.

Las CUEs promedio ponderado del total de los concentrados producidos en el país muestran una reducción de 9% entre 1995 y el 2004, alcanzando este último año un valor de 1,39 TM de CO<sub>2</sub> equivalente por TMF en concentrados.

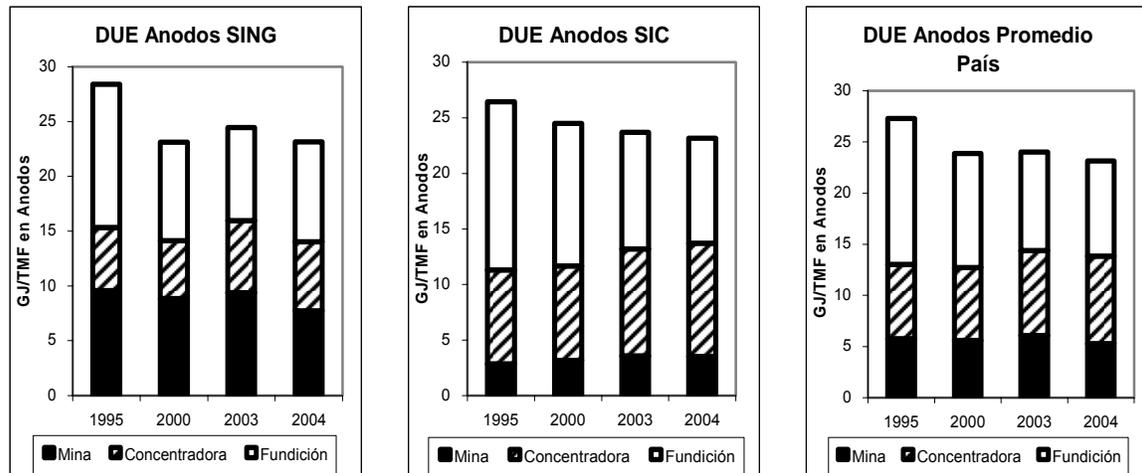
### 3.3.2 Anodos

El cobre blister es el producto de la fundición que se moldea como ánodos para continuar su procesamiento en la refinera. 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° 15 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.

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 23 y 28 GJ / TMF en ánodos. Las DUEs de los ánodos SING se reducen en el período en un 18%, con un valor en el año 2004 de 23,14 GJ, mientras que las de los ánodos SIC bajan un 12%, alcanzando el 2004 un valor de 23,15 GJ.

**Figura N° 15**  
**Demanda Unitaria de Energía Anodos**



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

Las contribuciones relativas de la mina y concentradora en los ánodos asociados al SING fluctúan en el período en torno a 35% y 25% respectivamente, mientras que la etapa de fundición disminuye su participación de un 46% a un 39% del total de la DUE del ánodo.

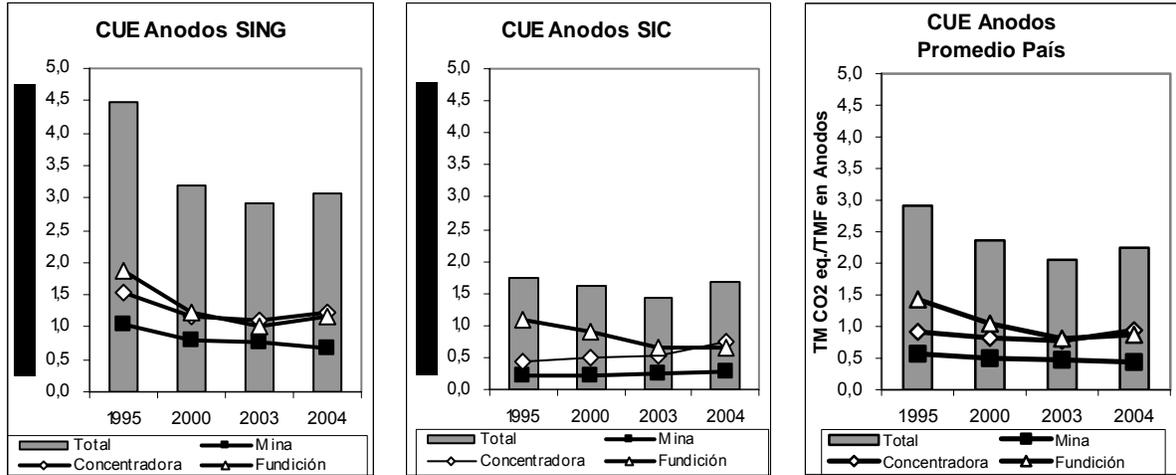
En el caso de los ánodos asociados al SIC, la mina aumenta su participación de un 11% a un 15% y la concentradora de 32% a 44%, mientras que la fundición baja de 57% a 41%.

En el año 2004, la DUE de los ánodos promedio ponderado país tiene una contribución de 23% de la etapa mina, 37% de la concentradora y 40% de la fundición.

En relación con la CUE, cuya evolución se muestra en la Figura N° 16, nuevamente los valores fueron entre 2 y 2,5 veces más altos en los ánodos que reciben abastecimiento eléctrico del SING que aquellos del SIC.

La CUE de los ánodos del SING baja un 31% en el período, llegando a un valor de 3,07 TM de CO<sub>2</sub> equivalente por TMF en ánodos en el año 2004. Las contribuciones de la mina y concentradora a la CUE de los ánodos SING se mueven en el período en torno a un 23% y 38% respectivamente, mientras la fundición reduce su contribución desde un 42% a un 38%.

**Figura N° 16**  
**Carga Unitaria de Emisión Anodos**



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

Por su parte, la CUE de los ánodos SIC se mantiene relativamente estable entre 1995 y 2004, reduciéndose en un 5%, para alcanzar el año 2004 un valor de 1,67 TM de CO<sub>2</sub> equivalente por TMF en ánodos. La contribución de la mina a la CUE sube de 12% a 16% y la de la concentradora de 26% a 45%, lo que se debe principalmente al aumento del perfil de emisiones del sistema de generación eléctrica, porque, como se explicó anteriormente, el consumo de energía de la concentradora corresponde prácticamente en un 100% a energía eléctrica. El área de fundición disminuye su contribución desde un 62% en 1995 a un 39% en el 2004, producto de los cambios tecnológicos impulsados por medidas ambientales.

La CUE promedio ponderado de los ánodos producidos en el país disminuye en un 23%, fundamentalmente por la disminución de las emisiones en el área mina y fundición, alcanzando en el año 2004 un valor de 2,25 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 reciben para su procesamiento 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.

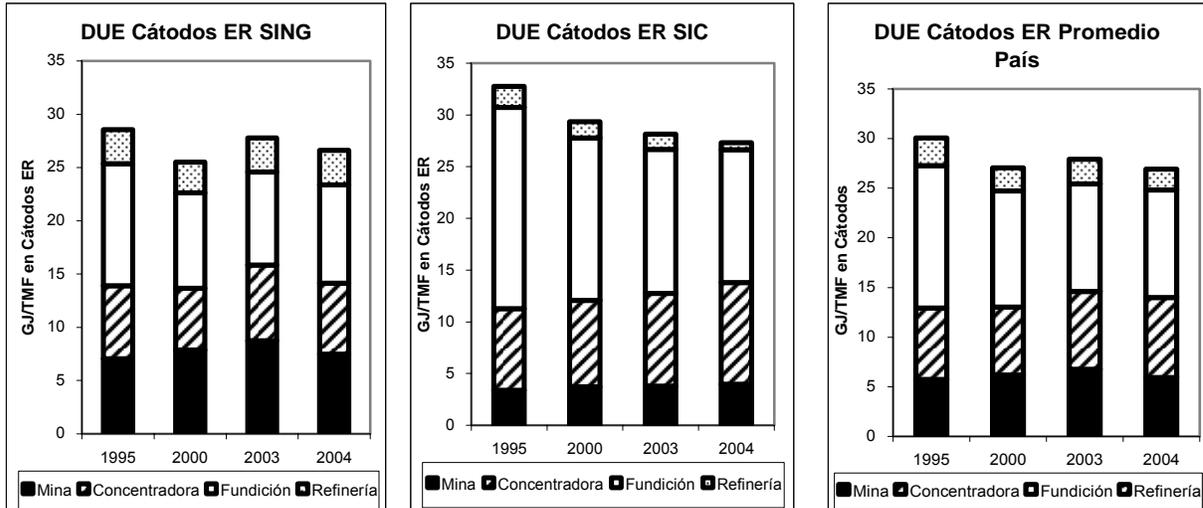
### 3.3.3 Cátodos ER

La Figura N°17 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 disminuye entre 1995 y 2004 en un 7%, llegando en el 2004 a un valor de 26,6 GigaJoule / TMF en cátodos ER. Las contribuciones a la DUE de la mina, concentradora y refinería, con algunas fluctuaciones, se mantienen bastante estables en el período, con valores de alrededor de 28%, 25% y 12% respectivamente. El área fundición reduce su contribución de 40% a 35%.

Los cátodos ER producidos con energía eléctrica generada por el SIC muestran DUEs que disminuyen sostenidamente en el período (17%), alcanzando en el 2004 un valor de 27,3 GigaJoule / TMF en cátodos ER. La contribución de la mina aumenta de un 10% a un 15%, y la concentradora de 24% a 36%, mientras que la fundición baja su participación de 59% a 47% y la refinería de 6% a 2%.

**Figura N° 17**  
**Demanda Unitaria de Energía Cátodos Electrorefinados**

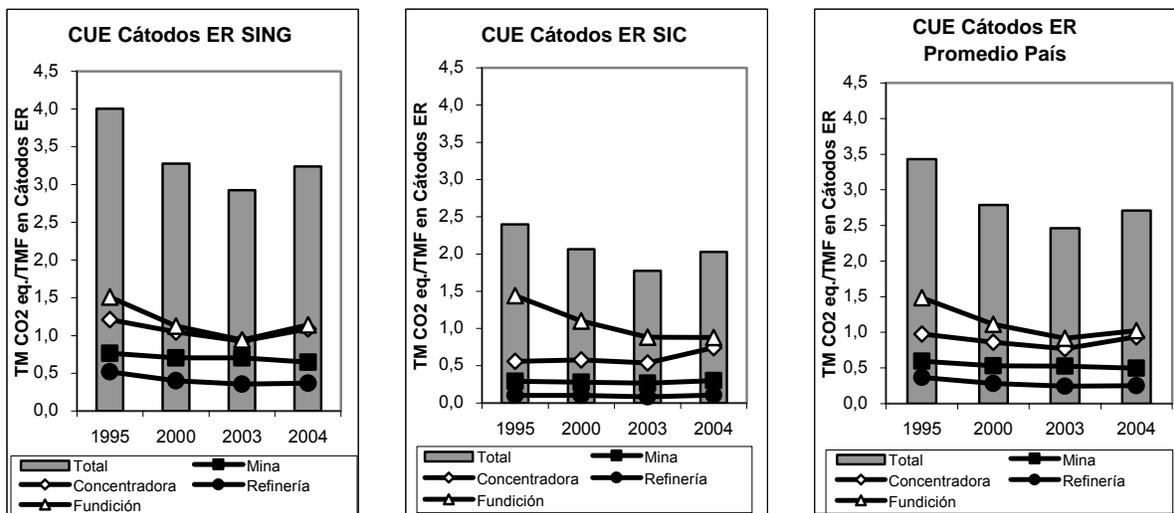


Fuente: Elaborado por la Comisión Chilena del Cobre en base a información de las empresas.

Las DUEs promedio ponderado de los cátodos ER producidos en Chile muestran una tendencia decreciente en el período (10%), llegando a 26,9 GigaJoule / TMF en cátodos ER.

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°18. Al igual que en el caso de los ánodos, no hay un “cátodo ER puro” asociado al SING o al SIC, porque las refinerías 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° 18**  
**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 baja en el período un 19%, llegando en el año 2004 a un valor de 3,24 TM de CO<sub>2</sub> equivalente por TMF en cátodos ER. El incremento del valor de la CUE entre el año 2003 y 2004 se debe fundamentalmente al aumento de las emisiones unitarias del SING por

cambio en los combustibles utilizados por las centrales generadoras producto de la crisis del gas (gas natural a diesel y carbón). Las contribuciones de la mina y la refinería no experimentan cambios mayores, manteniéndose en torno a 21% y 12% respectivamente. Por su parte, las participaciones de la concentradora y la fundición muestran una tendencia decreciente hasta el año 2003 y un ligero aumento en el 2004, por lo explicado anteriormente, con valores alrededor de 32% y 35% respectivamente.

La CUE de los cátodos ER del SIC disminuye en un 15% impulsada por la baja de la fundición. En el año 2004 se tiene un valor de 2,03 TM de CO<sub>2</sub> equivalente por TMF en cátodos ER. La concentradora, que consume prácticamente sólo energía eléctrica experimenta un aumento el último año debido al incremento de los coeficientes unitarios de emisión del SIC. Las contribuciones de la mina y la refinería se mantienen relativamente estables en el período (15% y 5% respectivamente), mientras que la concentradora aumenta de 23% a 37% y la fundición disminuye de 60% a 43%.

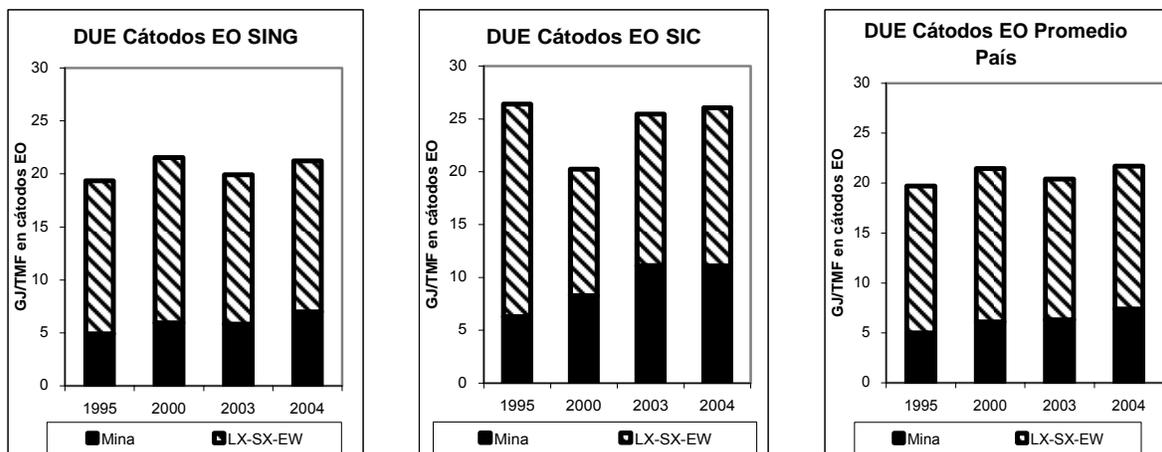
Durante todos los años del estudio las CUEs de los cátodos ER producidos en el SING son alrededor de 1,6 veces las CUEs de los cátodos ER del SIC.

Los valores de las CUEs para el promedio ponderado de los cátodos ER producidos en el país muestran una tendencia decreciente entre 1995 y 2003, para luego aumentar ligeramente el último año del período, alcanzando un valor de 2,71 TM de CO<sub>2</sub> equivalente por TMF en cátodos ER. La contribución de la mina y la refinería se mantiene del orden de 18% y 10% respectivamente, mientras que la concentradora aumenta de 28% a 35% y la fundición disminuye su aporte de 43% a 38%.

### 3.3.4 Cátodos EO

Los cátodos electroobtenidos (EO), que se obtienen a través del tratamiento de minerales lixiviables, incrementaron su producción entre 1995 y el año 2004 en un 339%, producto de la entrada en operación de varias nuevas minas que explotan este tipo de mineral, la mayoría de las cuales se abastecen de energía eléctrica del SING.

**Figura N° 19**  
**Demanda Unitaria de Energía Cátodos Electroobtenidos**



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

En la Figura N°19 se muestran los perfiles de DUE de los cátodos EO. Las DUE de los cátodos EO que se producen con energía eléctrica del SING experimentan un ligero aumento entre 1995 y el año 2004 (10%), alcanzando este último año un valor de 21,24 GigaJoule / TMF en cátodos EO. La mina contribuye con un 33% del consumo de energía, mientras que las operaciones de lixiviación, extracción por solventes y electroobtención, en conjunto, contribuyen con el 67%.

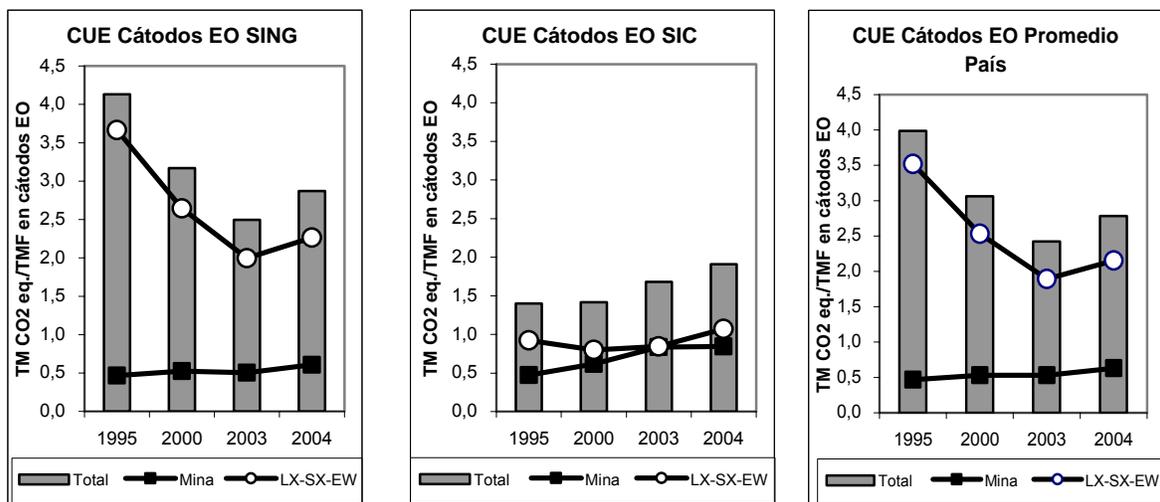
Los cátodos EO producidos con energía eléctrica del SIC tienen DUEs superiores a sus homólogos producidos con energía eléctrica del SING. Luego de una baja en el año 2000, que se debe fundamentalmente a una menor contribución de la mina, los valores retornan a los niveles anteriores, alcanzando en el año 2004 a 26,06 Gigajoule / TMF en cátodos EO. En promedio en el período, la mina aumenta su contribución de 24% a 43%, mientras que el resto de las operaciones disminuyen su contribución al consumo de energía de 76% a 57%.

La DUE promedio ponderado del total de los cátodos producidos en el país se incrementa entre 1995 y el 2004 en un 10%, llegando en el último año del estudio a un valor de 21,69 Gigajoule / TMF en cátodos EO. En el promedio ponderado país la mina aumenta su contribución de 25% a 34%, mientras que el conjunto de las operaciones de tratamiento de minerales lixiviables (LX-SX-EW) la disminuye de 75% a 66%.

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

La Figura N°20 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.

**Figura N° 20**  
**Carga Unitaria de Emisión Cátodos Electroobtenidos**



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 disminuyen entre 1995 y 2004 en un 30%, alcanzando en el año 2004 un valor de 2,87 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 (más de 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). La contribución de la mina se incrementa de un 11% en 1995 a un 21% en el año 2004.

Los cátodos EO asociados al SIC muestran CUEs crecientes en el período (37%), influidas principalmente por las contribuciones de la mina, que aumenta de 34% a 44%, llegando en el año 2004 a un valor de 1,91 TM CO<sub>2</sub> equivalente / TMF en cátodos EO.

Las CUEs de los cátodos EO del SING son entre 3 y 1,5 veces superiores a aquellas del SIC.

Por la importancia de la producción de cátodos EO que se abastecen de energía eléctrica del SING (más de 90%), el promedio ponderado país de estos cátodos sigue el perfil de emisiones de los cátodos SING, reduciéndose las CUEs en el período en un 30%, para alcanzar en el año 2004 un valor de 2,78 TM CO<sub>2</sub> equivalente / TMF en cátodos EO.

**Tabla N° 5**  
**Valores de DUEs para Productos Comerciales de Cobre**  
**Año 2004**

	<b>Unidades</b>	<b>SING</b>	<b>SIC</b>	<b>Promedio Ponderado País</b>
DUE Concentrados	GJ/TMF en conc.	<b>12,01</b>	<b>13,50</b>	<b>12,67</b>
DUE Anodos	GJ/TMF en ánodos	<b>23,14</b>	<b>23,15</b>	<b>23,15</b>
DUE Cátodos ER	GJ/TMF en cátodos ER	<b>26,61</b>	<b>27,30</b>	<b>26,92</b>
DUE Cátodos EO	GJ/TMF en cátodos EO	<b>21,24</b>	<b>26,06</b>	<b>21,69</b>

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

**Tabla N° 6**  
**Valores de CUEs para Productos Comerciales de Cobre**  
**Año 2004**

	<b>Unidades</b>	<b>SING</b>	<b>SIC</b>	<b>Promedio Ponderado País</b>
CUE Concentrados	TM CO <sub>2</sub> eq./TMF en conc.	<b>1,74</b>	<b>0,96</b>	<b>1,39</b>
CUE Anodos	TM CO <sub>2</sub> eq./TMF en ánodos	<b>3,07</b>	<b>1,67</b>	<b>2,25</b>
CUE Cátodos ER	TM CO <sub>2</sub> eq./TMF en cátodos ER	<b>3,24</b>	<b>2,03</b>	<b>2,71</b>
CUE Cátodos EO	TM CO <sub>2</sub> eq./TMF en cátodos EO	<b>2,87</b>	<b>1,91</b>	<b>2,78</b>

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

## IV CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

Este estudio constituye una experiencia pionera, por lo menos a nivel nacional, en cuanto a entregar información 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, la producción de una tonelada de cobre fino, a nivel país, en la forma de cátodo electrorefinado (ER), tuvo un costo energético variable entre 26,92 GJ y 30,07 GJ, dependiendo del año. Para el caso de los cátodos electroobtenidos (EO) este costo energético varió entre 19,71 GJ y 21,69 GJ.

La única información disponible para efectuar algunas comparaciones dentro de la industria es la publicada en el paper de Norgate y Ranking (2000) para cátodos ER, donde se utilizaron datos extraídos de la literatura para distintos procesos mineros y de refinación (33 GJ), cuyo valor está en el rango del calculado para Chile. Para el caso de los cátodos EO, este mismo paper indica un valor de 64 GJ, el que es muy superior a los valores determinados para la producción de este tipo de producto en Chile.

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 3,43 y 2,46 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente. Por su parte, la carga unitaria de emisión (CUE) del cátodo electroobtenido varió entre 3,99 y 2,42 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente.

Comparando con la información disponible en el paper mencionado anteriormente, se tiene que el GWP para el cátodo ER es de 3,3 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente, mientras que el del cátodo EO es de 6,2 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente.

Existe una gran variedad de factores que pueden explicar la diferencia de los valores en cuanto a consumo de energía para la producción de cátodos EO, entre los cuales están la ley del mineral procesado, las distancias de acarreo, el tipo de lixiviación utilizada, etc., los que no se encuentran detallados en el citado paper, ya que sólo se indica que se utilizaron datos de la literatura. Estos mayores consumos energéticos se reflejan luego en mayores emisiones, a lo que se agrega el tipo de combustible utilizado para la generación de la electricidad que se usa intensivamente en las etapas de lixiviación, extracción por solvente y electrodeposición, lo que tampoco se indica en el paper.

Debido a que el concentrado de cobre también es un producto comercial relevante para el país, a continuación se comentan los resultados obtenidos para este producto.

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. En el año 2004 el país exportó 2,165 millones de TM de cobre fino en concentrados.

En los años considerados en el estudio, la producción de una tonelada de cobre fino en la forma de concentrado en las faenas mineras que se abastecen de energía eléctrica del SING, tuvo un costo energético que varió entre 11,35 GJ y 13,41 GJ, dependiendo del año. Para el caso de los concentrados asociados al SIC este costo energético varió entre 10,76 GJ y 13,50 GJ.

En términos de emisiones de GEI, la producción de una tonelada de cobre fino en la forma de concentrado de cobre de faenas asociadas al SING, dependiendo del año, tuvo una CUE variable

entre 1,70 y 2,26 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente. Por su parte, la CUE de los concentrados SIC varió entre 0,46 y 0,96 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente.

Lo anterior significa que, si bien, los consumos de energía para producir una tonelada de cobre fino en la forma de concentrado son bastante similares en ambas matrices energéticas (SING y SIC), las CUEs difieren sustancialmente, siendo las de los concentrados SING entre 2 y 5 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 la reducción que se observa en cuanto a consumo unitario de energía a nivel país por parte de la minería del cobre, el que disminuye entre 1995 y 2004 en un 8,4%, llegando a un valor de 18,4 GigaJoule / TMF producido. Las emisiones unitarias totales de GEI también experimentan una reducción de 15%, alcanzando en el 2004 un valor de 2,1 TM CO<sub>2</sub> equivalente / TMF producido.

A la reducción en los consumos unitarios de energía ha contribuido, en particular en lo que se refiere a consumo directo, el cambio tecnológico que ha significado la detención de los hornos reverbero y su reemplazo por convertidores Teniente en la etapa de fundición. Como ya se ha señalado, estas reducciones se verifican a pesar de: aumentos en producción; disminuciones de ley, e introducción de tecnologías de captura de gases que son intensivas en uso de energía eléctrica. El alcance general del presente estudio, sin embargo, no permite identificar a qué combinación de factores y tecnologías específicas responde la reducción señalada. Lo que sí es claro es que esta reducción se dio en conjunto con una creciente dependencia de energía eléctrica, en todas las faenas productivas.

La disminución de las emisiones unitarias totales se ha visto impulsada, por una parte, por una reducción de las emisiones directas debido al menor uso directo en el proceso de combustibles fósiles (cambio tecnológico), y por otra, por la fuerte reducción de los coeficientes unitarios de emisión del SING, sistema de generación al que se encuentra asociada un 66% de la producción de cobre fino del país.

En términos de emisiones de GEI, la conclusión más evidente es la 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. Se puede sugerir una conclusión tentativa interesante a partir de esta observación: 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, dependiendo de cómo evolucionan las configuraciones de los sistemas SIC y SING.

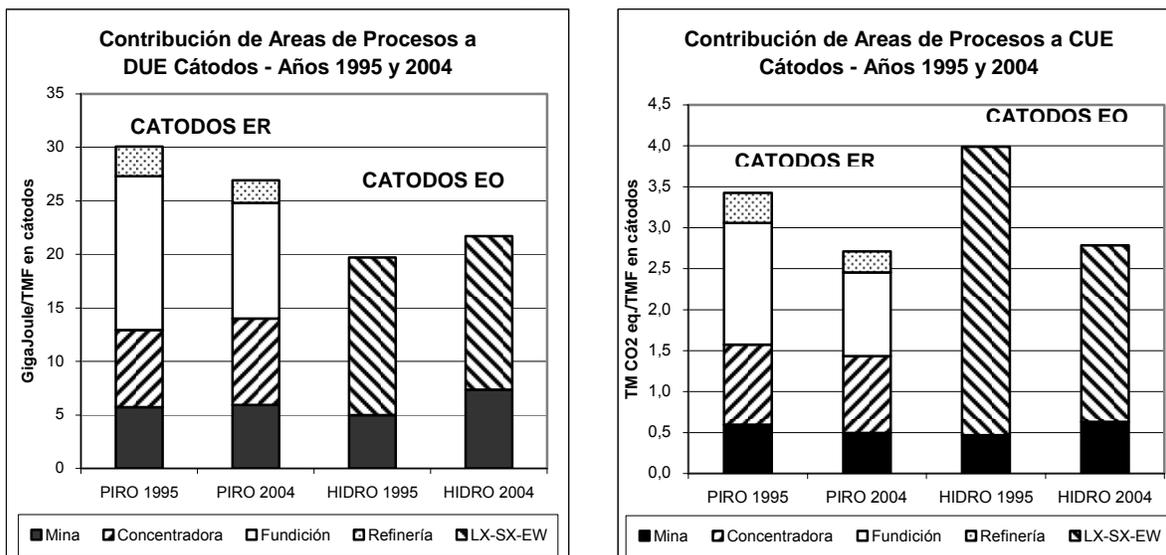
Teniendo en consideración la relevancia que ha adquirido en los últimos tiempos la problemática del Calentamiento Global, no obstante que Chile no tiene hasta la fecha compromisos de reducción de emisiones, y teniendo en cuenta que en el año 2004 el 66% de la producción de cobre se abasteció de energía eléctrica del SING, transformándose ésta en el principal cliente de este sistema de generación (más del 80%), 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.

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 en Chile, en forma comparativa las vías piro e hidrometalúrgica, tanto en cuanto a consumo de energía como a emisiones de GEI.

**Figura N° 21**



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 mucho 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 1995 un 53% más de energía que la producción de 1 tonelada de cátodos EO (en el año 2004 el mayor gasto fue de 24%). Por otra parte, la vía piro (cátodos ER) muestra entre los años 1995 y 2004 una tendencia decreciente (10,5%) en los consumos unitarios de energía, mientras que la vía hidro (cátodos EO) muestra una tendencia creciente (10,1%) en el mismo período.

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 1995 la producción de 1 tonelada de cátodos EO generó un 16% más de emisiones que la producción de 1 tonelada de cátodos ER (en el año 2004 la mayor emisión fue de 3%). Por otra parte, ambas vías de producción de cobre muestran entre los años 1995 y 2004 una tendencia decreciente, la vía pirometalúrgica (cátodos ER) reduce las emisiones unitarias en un 21%, mientras que la vía hidrometalúrgica (cátodos EO) lo hace en un 30% 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, más del 90% de la producción de cátodos EO (vía hidro) proviene de faenas mineras que reciben abastecimiento eléctrico del SING, sistema de generación que experimentó una fuerte reducción de sus coeficientes unitarios de emisión entre los años 1995 y 2004, lo que se refleja en la reducción de un 30% de la CUE de los cátodos EO (hidro) en el período.

## 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**  
**Cuadro 1A: Gases de Efecto Invernadero**

Gas	Símbolo químico	Gas	Símbolo químico
<i>Grupo del carbono</i>		<i>Grupo halógeno</i>	
Monóxido de carbono	CO	Triclorofluorometano (Freón 11)	CFCl <sub>3</sub>
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	Diclorodifluorometano (Freón 12)	CF <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>
Metano	CH <sub>4</sub>	Clorotrifluorometano (Freón 13)	CF <sub>3</sub> Cl
		Diclorofluorometano (Freón 21)	CFHCl <sub>2</sub>
<i>Grupo del oxígeno</i>		Clorodifluorometano (Freón 22)	CF <sub>2</sub> HCl
Ozono	O <sub>3</sub>	Triclorofluoroetano (Freón 113)	CF <sub>3</sub> CCl <sub>3</sub>
		Diclorotetrafluoroetano (Freón 114)	C <sub>2</sub> F <sub>4</sub> Cl <sub>2</sub>
<i>Grupo del nitrógeno</i>		Cloropentafluoroetano (Freón 115)	C <sub>2</sub> F <sub>5</sub> Cl
Óxido nitroso	N <sub>2</sub> O	Hexafluoroetano (Freón 116)	C <sub>2</sub> F <sub>6</sub>
Dióxido de nitrógeno	NO <sub>2</sub>	Metil bromuro	CH <sub>3</sub> Br
Pentóxido dinitrógeno	N <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Dibromuro de etano	BrCH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> Br
Ácido nítrico	HNO <sub>3</sub>	Bromotrifluorometano	CF <sub>3</sub> Br
Amoníaco	NH <sub>3</sub>	Cloruro de metilo	CH <sub>3</sub> Cl
		Dicloruro de metilo	CH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>
<i>Grupo del azufre</i>		Dicloroetano	CH <sub>2</sub> ClCH <sub>2</sub> Cl
Dióxido de azufre	SO <sub>2</sub>	Tricloroetileno	C <sub>2</sub> HCl <sub>3</sub>
Hexafluoruro de azufre	SF <sub>6</sub>	Tetracloroetileno	C <sub>2</sub> Cl <sub>4</sub>
Sulfuro de carbonilo	COS	Metil cloroformo	CH <sub>3</sub> CCl <sub>3</sub>
Disulfuro de carbono	CS <sub>2</sub>	Tetrafluoruro de carbono	CF <sub>4</sub>
Ácido sulfhídrico	H <sub>2</sub> S	Tetracloruro de carbono	CCl <sub>4</sub>
<i>Hidrocarburos no-metánicos</i>			
Acetileno	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>		
Acetaldehido	CH <sub>3</sub> CHO		
Formaldehido	HCHO		
Etileno	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>		
Etano	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>		
Propano	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>		
Butano	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>		
Metilpentano	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>		
<i>Otros</i>			
Peroxiacetil nitrato	PAN		

Fuente: Krause et al. (1989), obtenido de WMO (1982), Chamberlain et al. (1982) y Ramanathan et al. (1985).

En los cuadros de las páginas siguientes, se presentan algunas características de los principales GEI.

**Cuadro 1B: Características de gases de efecto invernadero**

Características	Gas		
	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O
Concentración en la atmósfera	346 ppm (1986)	1,7 ppm (1985)	0,31 ppm (1985)
Tiempo de residencia en la atmósfera	100 años aprox. (para atmósfera, biosfera y parte superior del océano)	7-10 años	170 años aprox.
Tendencia de concentración (1985)	Aprox. + 0,4%/año	1,1± 0,1%/año (1951-1983)	0,2-0,3%/año
Radiativa y químicamente interactivo	Uno de los más importantes absorbentes de infrarrojo en los rangos 550-800; 850-1.100; 2.100-2.400 cm <sup>-1</sup>	Absorbe en el infrarrojo (950-1.650 cm <sup>-1</sup> ). Químicamente reactivo tanto en la troposfera como en la estratosfera.	Un fuerte absorbente en el infrarrojo (520-660; 1.200-1.350; 2.120-2.270 cm <sup>-1</sup> )
Efecto climático directo	El incremento de la temperatura media global superficial de equilibrio debido al efecto radiativo directo de doblar la concentración de CO <sub>2</sub> (2×CO <sub>2</sub> ) es ΔT <sub>e</sub> = 1,3 K; incluyendo retroalimentación climática es ΔT <sub>e</sub> = 1,5-4,5 K.	Para 2×CH <sub>4</sub> , ΔT <sub>e</sub> = 0,2-0,4 K.	Para 2×N <sub>2</sub> O, ΔT <sub>e</sub> = 0,3-0,4 K.
Efecto químico directo	Ninguno.	Mayor concentración de CH <sub>4</sub> : - reduce OH en la troposfera - produce O <sub>3</sub> en la troposfera y en la baja estratosfera - disminuye el O <sub>3</sub> en la alta estratosfera a través de la producción de HO <sub>x</sub> - incrementa el H <sub>2</sub> O en la estratosfera - reduce la efectividad de Cl y NO <sub>x</sub> sobre O <sub>3</sub> en la estratosfera	A través de la reacción de N <sub>2</sub> O con O ( <sup>1</sup> D) principal fuente de NO <sub>x</sub> en la estratosfera. Reduce el O <sub>3</sub> en la estratosfera. Interactúa con ClO <sub>x</sub> y HO <sub>x</sub> .
Interacciones climato-químicas	Cambios en el perfil de temperaturas de la atmósfera afectan la velocidad de reacción de los gases. Cambios de temperatura en la estratosfera cambian la distribución del ozono, que afecta el clima a nivel de la superficie.	Reducción de OH en la troposfera, desacelera la remoción de CH <sub>4</sub> y otros gases traza. Efectos sobre el O <sub>3</sub> y H <sub>2</sub> O tiene implicaciones sobre el clima. Clima más cálido cambia las fuentes bioquímicas de CH <sub>4</sub> . Cambios en la distribución de temperatura afecta la tasa de pérdida atmosférica de CH <sub>4</sub> .	La destrucción de O <sub>3</sub> <sup>-</sup> en la estratosfera tiene implicancias climáticas. El calentamiento de la troposfera afecta las tasas de fuentes biogénicas.
Efecto climático de una molécula en relación al CO <sub>2</sub>	1	25-32	150-250

**Cuadro 1B: Características de gases de efecto invernadero (cont.)**

Características	Gas			
	CFC-11	CFC-12*	O <sub>3</sub>	OH
Concentración en la atmósfera	0,20 ppb (1985) 0,32 ppb (1985)*		Troposfera: 0,02-0,1 ppm; 2-3 veces más alto en zonas urbanas. Estratosfera: 0,1-10 ppm	Troposfera: 0,015 ppt aprox. Baja estratosfera: 0,02 ppt aprox. Alta estratosfera: 0,3 ppb
Tiempo de residencia en la atmósfera	Aprox. 65 años Aprox. 110 años*		O <sub>x</sub> (ozono+átomos de oxígeno) está: - aprox. 1 hora en la alta estratosfera - meses en la baja estratosfera - horas a días en la troposfera	Segundos a minutos
Tendencia de concentración (1985)	Aprox. 5%/año		Desconocido, pero información satelital y de superficie indica que: - O <sub>3</sub> está decreciendo en la alta estratosfera - O <sub>3</sub> está aumentando en la troposfera	Mayormente desconocido. El aumento de CH <sub>4</sub> y CO sugieren una reducción de aprox. 25% desde 1900 a nivel de la troposfera
Radiativa y químicamente interactivo	Fuertes absorbedores del infrarrojo (800-1.200 cm <sup>-1</sup> ) (850-1.250 cm <sup>-1</sup> )*, inertes en la troposfera. Disociación en la estratosfera lleva a compuestos de cloro altamente reactivos.		Un gran absorbedor tanto de radiación solar como infrarroja (600-800, 950-1.200 cm <sup>-1</sup> ). Producción y destrucción de O <sub>3</sub> afectada fuertemente por procesos químicos	Radiativamente: no; químicamente: si.
Efecto climático directo	Para un cambio desde 0 a 2 ppb, ΔT <sub>s</sub> ≈ 0,3 K*		El aumento en el O <sub>3</sub> troposférico y una disminución del O <sub>3</sub> estratosférico, incrementan la temperatura superficial. Un incremento del 50% del O <sub>3</sub> troposférico lleva a un calentamiento de aprox. 0,3 K.	Ninguno
Efecto químico directo	Disociación lleva a compuestos clorados que también reaccionan con HO <sub>x</sub> y NO <sub>x</sub> y juntos pueden llevar a una importante destrucción de O <sub>3</sub> en la estratosfera.		El O <sub>3</sub> troposférico puede cambiar: - directamente debido a CO, NO <sub>x</sub> , CH <sub>4</sub> , HC - indirectamente debido a O <sub>3</sub> estratosférico El O <sub>3</sub> estratosférico puede cambiar debido a CFCs, N <sub>2</sub> O, NO <sub>x</sub> , H <sub>2</sub> O, CH <sub>4</sub> , CO <sub>2</sub> y circulación.	En la troposfera: - controla la duración y abundancia de CH <sub>4</sub> y CO - principal oxidante de CO, H <sub>2</sub> O, CH <sub>3</sub> CCl <sub>3</sub> , NO <sub>x</sub> y todo HC - inicia el smog fotoquímico En la estratosfera: - es un catalizador en la destrucción de O <sub>3</sub> - - afecta a otros catalizadores a través de reacciones con Cl y NO <sub>x</sub>

Características	Gas		
	CFC-11 CFC-12*	O <sub>3</sub>	OH
Interacciones climato-químicas	La destrucción de O <sub>3</sub> en la estratosfera tiene implicaciones climáticas en la troposfera.	El O <sub>3</sub> afecta la distribución de temperaturas, lo que influye en los mecanismos de destrucción de O <sub>3</sub>	Tiene un fuerte efecto indirecto debido a su efecto sobre gases radiativamente importantes (CH <sub>4</sub> , O <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> O, CH <sub>3</sub> CCl <sub>3</sub> ). Determina los efectos últimos de otros compuestos traza sobre O <sub>3</sub> .
Efecto climático de una molécula en relación al CO <sub>2</sub>	14.000-17.500 17.000-20.000*	2.000	-

**Cuadro 1B: Características de gases de efecto invernadero (cont.)**

Características	Gas	
	CO	NO <sub>x</sub>
Concentración en la atmósfera	HN: 0,20 ppm (1984) HS: 0,05 ppm (1984)	En áreas remotas de troposfera: 10-30 ppt En áreas pobladas de troposfera: > 1.000 ppt En la estratosfera: aprox. 0,02 ppm
Tiempo de residencia en la atmósfera	0,4 años (global); 0,1 años (en el trópico)	En la troposfera: 1-7 días En la estratosfera: mayor tiempo
Tendencia de concentración (1985)	2 (1-5) %/año	Incierto debido a grandes variaciones espaciales y temporales
Radiativa y químicamente interactivo	Es un débil absorbedor en el infrarrojo. Reacciona con OH, también producido en la atmósfera por oxidación de CH <sub>4</sub> y otros HC.	Radiativamente sí, pero no de importancia. Químicamente interactivo a través de: - reacciones con OH y H <sub>2</sub> O en la troposfera - determinar la distribución de O <sub>3</sub> en la estratosfera
Efecto climático directo	Sin efecto climático directo	El NO <sub>2</sub> absorbe radiación solar, pero puede no ser de importancia. Los efectos indirectos no son bien conocidos.
Efecto químico directo	El CO usa OH para la oxidación que, a su vez, afecta la tasa de oxidación de CH <sub>4</sub> y otros HC. En presencia de NO <sub>x</sub> lleva a la formación de O <sub>3</sub> en la troposfera. En última instancia reacciona para formar CO <sub>2</sub> .	En la troposfera: NO y NO <sub>2</sub> son catalizadores muy activos en reacciones que crean O <sub>3</sub> y smog fotoquímico. En la estratosfera: Los NO <sub>x</sub> determinan al O <sub>3</sub> . Los NO <sub>x</sub> también influyen fuertemente en las reacciones conducentes a la oxidación del CH <sub>4</sub> .
Interacciones climato-químicas	Afecta al clima a través de sus efectos sobre OH, O <sub>3</sub> , CH <sub>4</sub> y otros HC.	Sus interacciones químicas con otros compuestos cambian al O <sub>3</sub> y afectan al clima.
Efecto climático de una molécula en relación al CO <sub>2</sub>	No disponible	No disponible

Fuente: Traducción propia a partir de Krause et al (1989)

## ANEXO 2

### 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
- Zaldivar
- Planta Taltal (ENAMI)

#### Faenas Asociadas al SIC

- Salvador
- Planta Salado (ENAMI)
- Atacama Kosan
- Manto Verde
- Candelaria
- Punta del Cobre
- Planta Matta (ENAMI)
- Fundición Paipote
- Pelambres
- Andacollo
- El Soldado
- Andina
- Fundición Chagres
- Los Bronces
- Fundición y Refinería Ventanas
- El Teniente

Este trabajo fue elaborado por:

Sara Inés Pimentel Hunt  
con la colaboración de  
Pedro Santic Contreras

**Marzo 2007**