



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE  
ESCUELA DE INGENIERIA

# **ANÁLISIS DE LA HUELLA DE CARBONO EN UNA EMPRESA MINERA DEL COBRE EN CHILE**

**JUAN FRANCISCO BUSTOS DONOSO**

Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería

Profesor Supervisor:

**GUSTAVO LAGOS CRUZ-COKE**

Santiago de Chile, Junio de 2011

© 2011, Juan Francisco Bustos Donoso



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE  
ESCUELA DE INGENIERIA

# **ANÁLISIS DE LA HUELLA DE CARBONO EN UNA EMPRESA MINERA DEL COBRE EN CHILE**

**JUAN FRANCISCO BUSTOS DONOSO**

Tesis presentada a la Comisión integrada por los profesores:

**GUSTAVO LAGOS**

**HÉCTOR JORQUERA**

**JUAN CARLOS TORRES**

**SERGIO GUTIÉRREZ**

Para completar las exigencias del grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería

Santiago de Chile, Junio de 2011

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar agradezco al profesor Gustavo Lagos por su paciente labor como guía de esta Tesis. Se agradecen sus observaciones y consejos durante el largo período que me tomó desarrollarla.

Agradezco también la excelente disposición de las personas del Área de Medio Ambiente del Instituto de Innovación en Minería y Metalurgia (IM2), filial de Codelco, que accedieron a facilitarme los datos que me permitieron realizar esta Tesis. Se agradece en particular a Priscilla Leufuman por el tiempo dedicado en facilitarme los datos, así como por enseñarme lo necesario acerca del uso del programa GaBi y estar siempre dispuesta a resolver dudas. Agradezco también a Juan Carlos Torres y Rodrigo Cristi por la entrega de datos y observaciones en relación al trabajo desarrollado.

## ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS .....	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ÍNDICE DE TABLAS .....	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS .....	XVII
RESUMEN.....	XXIV
ABSTRACT.....	XXV
1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 GASES DE EFECTO INVERNADERO.....	2
1.2 GRADOS DE ALCANCE DE LA HUELLA DE CARBONO.....	3
1.2.1 Huella de carbono de alcance I .....	4
1.2.2 Huella de carbono de alcance II.....	5
1.2.3 Huella de carbono de alcance III.....	7
1.3 INSTRUMENTOS DE ANÁLISIS COMPUTACIONALES PARA LA HUELLA DE CARBONO..	9
2. OBJETIVOS .....	13
2.1 OBJETIVO PRINCIPAL.....	13
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
PARTE I: ANÁLISIS DE LAS EMISIONES DE GEI Y CONSUMO DE ENERGÍA DE LOS PRODUCTOS Y PROCESOS MODELADOS POR CODELCO UTILIZANDO GABI.....	14
3. MARCO TEÓRICO PARTE I.....	15
4. EMISIÓN PROMEDIO SEGÚN TIPO DE PRODUCTO DENTRO DE LA EMPRESA, AÑO 2005: ALCANCES Y COMPARACIONES .....	29
4.1 EMISIONES SEGÚN TIPO DE PRODUCTO .....	29
4.2 INFLUENCIA DE LA MATRIZ ELÉCTRICA EN LA HUELLA DE CARBONO DE LOS PRODUCTOS.....	35

4.3 PARTICIPACIÓN PORCENTUAL DE LOS ALCANCES A NIVEL DE EMPRESA .....	37
4.4 CONTRIBUCIÓN DE LOS INSUMOS SEGÚN TIPO EN LAS EMISIONES DE GEI DE ALCANCE III EN LA EMPRESA .....	41
4.5 COMPARACIÓN DE LAS PARTICIPACIONES DE LOS GRADOS DE ALCANCE CON OTRAS FUENTES BIBLIOGRÁFICAS .....	56
4.6 DIFERENCIAS ENTRE LOS FACTORES DE EMISIÓN DE GABI CON LOS DE COCHILCO 58	
5. COMPARACIÓN DE PROCESOS POR SUS EMISIONES DE GEI .....	64
5.1 EMISIÓN PROMEDIO DE GEI DE LOS PROCESOS EN LA EMPRESA.....	64
5.2 COMPARACIÓN CON OTRAS FUENTES BIBLIOGRÁFICAS .....	65
6. CONSUMO ENERGÉTICO PROMEDIO SEGÚN TIPO DE PRODUCTO DENTRO DE LA EMPRESA, AÑO 2005.....	69
7. COMPARACIÓN DE PROCESOS POR SU CONSUMO ENERGÉTICO.....	72
7.1 CONSUMO ENERGÉTICO DE LOS PROCESOS EN LAS DISTINTAS DIVISIONES.....	73
7.1.1 Extracción en Mina Rajo.....	73
7.1.2 Extracción en Mina Subterránea .....	74
7.1.3 Concentración .....	75
7.1.4 Hidrometalurgia .....	77
7.1.5 Fundición (excluye Plantas de Ácido) .....	78
7.1.6 Plantas de Ácido.....	79
7.1.7 Electro Refinería .....	80
7.1.8 Servicios.....	81
7.2 CONSUMO ENERGÉTICO PROMEDIO PONDERADO DE LOS PROCESOS EN LA EMPRESA Y LOS DE COCHILCO .....	83
PARTE II: CÁLCULO DE LAS EMISIONES DE GEI Y CONSUMO DE ENERGÍA DE PRODUCTOS Y PROCESOS NO MODELADOS POR CODELCO UTILIZANDO GABI.....	87

8. MARCO TEÓRICO PARTE II .....	88
9. PRODUCCIÓN DE MOLIBDENO EN LA EMPRESA .....	96
9.1 CONCENTRADO DE MOLIBDENO ( $\text{MoS}_2$ ).....	98
9.2 ÓXIDO DE MOLIBDENO ( $\text{MoO}_3$ ).....	103
10. SEPARACIÓN DE LAS EMISIONES DE LA HIDROMETALURGIA EN LA EMPRESA EN LX, SX, Y EW .....	107
10.1 HIDROMETALURGIA DE CHUQUICAMATA.....	108
10.2 HIDROMETALURGIA DE RADOMIRO TOMIC .....	111
11. CONCLUSIONES .....	115
BIBLIOGRAFÍA .....	118
ANEXOS .....	121
A. EMISIONES DE GEI DE LOS PRODUCTOS MODELADOS EN GABI .....	122
A.1 CONCENTRADO DE COBRE DE CHUQUICAMATA .....	122
A.2 CÁTODO ER DE CHUQUICAMATA.....	123
A.3 CÁTODO EO DE CHUQUICAMATA .....	124
A.4 CÁTODO EO DE RADOMIRO TOMIC.....	125
A.5 CONCENTRADO DE COBRE DE SALVADOR.....	126
A.6 CÁTODO ER DE SALVADOR.....	127
A.7 CÁTODO EO DE SALVADOR .....	129
A.8 CONCENTRADO DE COBRE EN ANDINA .....	130
A.9 CONCENTRADO DE COBRE DE EL TENIENTE.....	131
A.10 CÁTODO ER DE EL TENIENTE/VENTANAS.....	132
A.11 RAF DE EL TENIENTE .....	133
A.12 FACTORES DE EMISIÓN DE LAS MATRICES ELÉCTRICAS.....	134
A.13 CONTRIBUCIÓN SEGÚN TIPO DE INSUMO EN LAS EMISIONES DE GEI EN CADA PRODUCTO.....	135
B. EMISIONES DE GEI DE LOS PROCESOS EN LA EMPRESA .....	137

B.1	EXTRACCIÓN EN MINA RAJO.....	137
B.2	EXTRACCIÓN EN MINA SUBTERRÁNEA.....	140
B.3	CONCENTRACIÓN .....	144
B.4	HIDROMETALURGIA .....	145
B.5	FUNDICIÓN .....	147
B.6	ELECTRO REFINERÍA .....	148
B.7	SERVICIOS .....	150
C.	CONSUMO DE ENERGÍA DE LOS PRODUCTOS MODELADOS EN GABI	
	153	
C.1	CONCENTRADO DE COBRE DE CHUQUICAMATA .....	153
C.2	CÁTODO ER DE CHUQUICAMATA.....	154
C.3	CÁTODO EO DE CHUQUICAMATA .....	156
C.4	CÁTODO EO DE RADOMIRO TOMIC.....	157
C.5	CONCENTRADO DE COBRE DE SALVADOR.....	159
C.6	CÁTODO ER DE SALVADOR.....	160
C.7	CÁTODO EO DE SALVADOR .....	162
C.8	CONCENTRADO DE COBRE DE ANDINA .....	164
C.9	CONCENTRADO DE COBRE DE EL TENIENTE.....	165
C.10	CÁTODO ER DE EL TENIENTE/VENTANAS.....	167
C.11	RAF DE EL TENIENTE .....	168
C.12	CONTRIBUCIÓN SEGÚN TIPO DE INSUMO EN LOS CONSUMOS ENERGÉTICOS DE ALCANCE III EN CADA PRODUCTO.....	170
D.	SENSIBILIDAD DE LA MATRIZ ELÉCTRICA EN EMISIONES DE GEI EN LOS PRODUCTOS MODELADOS EN GABI.....	172
D.1	CONCENTRADO DE COBRE DE CHUQUICAMATA .....	172
D.2	CÁTODO ER DE CHUQUICAMATA.....	173
D.3	CÁTODO EO DE CHUQUICAMATA .....	175
D.4	CÁTODO EO DE RADOMIRO TOMIC.....	176
D.5	CONCENTRADO DE COBRE DE SALVADOR.....	178

D.6	CÁTODOS ER DE SALVADOR.....	179
D.7	CÁTODOS EO DE SALVADOR .....	181
D.8	CONCENTRADO DE COBRE DE ANDINA .....	182
D.9	CONCENTRADO DE COBRE DE EL TENIENTE.....	184
D.10	CÁTODOS ER DE EL TENIENTE/VENTANAS.....	185
D.11	RAF DE EL TENIENTE .....	187
E.	DETALLE DE CONSUMOS ENERGÉTICOS CONSIDERADOS PARA DESAGREGAMIENTO DE HIDROMETALURGIA .....	189
E.1	HIDROMETALURGIA DE CHUQUICAMATA.....	189
E.1.1	CONSUMOS ENERGÉTICOS EN LIXIVIACIÓN .....	189
E.1.2	CONSUMOS ENERGÉTICOS EN EXTRACCIÓN POR SOLVENTES .....	191
E.1.3	CONSUMOS ENERGÉTICOS EN ELECTRO OBTENCIÓN.....	192
E.2	HIDROMETALURGIA DE RADOMIRO TOMIC .....	194
E.2.1	CONSUMOS ENERGÉTICOS EN LIXIVIACIÓN .....	194
E.2.2	CONSUMOS ENERGÉTICOS EN EXTRACCIÓN POR SOLVENTES .....	195
E.2.3	CONSUMOS ENERGÉTICOS EN ELECTRO OBTENCIÓN.....	196
F.	DETALLE DE CONSUMOS ENERGÉTICOS CONSIDERADOS PARA LA TOSTADORA DE CHUQUICAMATA.....	198

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1: Diferencias entre 2 embotelladoras producto de la consideración del alcance III .....	8
Tabla 3-1: Productos modelados en GaBi, cantidad producida y usos, en TFM Cu, año 2005 .....	18
Tabla 3-2: Producción de cobre por divisiones en la Empresa según el origen del mineral a partir de las cifras ingresadas en GaBi vs las cifras reales, en TFM Cu, año 2005 .....	19
Tabla 3-3: Factor de emisión promedio de fuentes eléctricas desarrollados por GaBi para Chile, en tCO <sub>2</sub> e/GWh producida , año 2005 .....	24
Tabla 3-4: Participación porcentual según tipo de fuentes en el SING y SIC, y factores de emisión de las matrices en tCO <sub>2</sub> e/GWh producida, año 2005 .....	25
Tabla 4-1: Resumen de emisiones unitarias por producto en la Empresa, con inclusión y exclusión de insumos, año 2005 .....	29
Tabla 4-2: Producción de concentrado de cobre en la Empresa, en TFM Cu, año 2005	30
Tabla 4-3: Emisión promedio de la producción de concentrado de cobre según área de matriz eléctrica en la Empresa, en kg CO <sub>2</sub> e/TMF Cu, año 2005 .....	30
Tabla 4-4: Emisión promedio de la producción de cátodo ER según área de matriz eléctrica en la Empresa, en kg CO <sub>2</sub> e/TMF Cu, año 2005 .....	31
Tabla 4-5: Emisión promedio de la producción de cátodo EO según área de matriz eléctrica en la Empresa, en kg CO <sub>2</sub> e/TMF Cu, año 2005 .....	32
Tabla 4-6: Emisión promedio de la producción de cátodo según área de matriz eléctrica en la Empresa, en kg CO <sub>2</sub> e/TMF Cu, año 2005 .....	32
Tabla 4-7: Tabla Emisión promedio de la producción de RAF según área de matriz eléctrica en la Empresa, en kg CO <sub>2</sub> e/TMF Cu, año 2005 .....	33
Tabla 4-8: Emisión promedio de 1 TFM Cu según área de matriz eléctrica en la Empresa, en kg CO <sub>2</sub> e/TMF Cu, año 2005 .....	34
Tabla 4-9: Emisión total por tipo de producto en la Empresa con escenarios de matriz eléctrica de mayor GEI y de menor GEI, en kg CO <sub>2</sub> e/TMF Cu, año 2005 .....	36

Tabla 4-10: Emisiones totales por tipo de producto en la Empresa, año 2005 .....	38
Tabla 4-11: Emisiones desagregadas de los productos de la Empresa, en kg CO <sub>2</sub> e/TMF Cu, año 2005 .....	39
Tabla 4-12: Principales insumos emisores de GEI a nivel total de la Empresa, año 2005 .....	42
Tabla 4-13: Principales insumos emisores de GEI en el concentrado de cobre en la Empresa, año 2005 .....	43
Tabla 4-14: Principales insumos emisores de GEI en el cátodo ER en la Empresa, año 2005 .....	44
Tabla 4-15: Principales insumos emisores de GEI en el RAF en la Empresa, año 2005	45
Tabla 4-16: Principales insumos emisores de GEI en el cátodo EO en la Empresa, año 2005 .....	46
Tabla 4-17: Producción nacional de cobre desagregada por matrices eléctricas y tipos de producto, año 2005, en TMF Cu .....	58
Tabla 4-18: Evaluación de las emisiones unitarias de los productos de Codelco para estimar la emisión total de la Industria del Cobre en Chile el 2005 .....	59
Tabla 4-19: Factores de emisión de las matrices SING y SIC, según tipo de fuente, en tCO <sub>2</sub> e/GWh producida .....	62
Tabla 5-1: Valores promedios ponderados de las emisiones de GEI de los procesos modelados en GaBi por la Empresa, año 2005 .....	65
Tabla 5-2: Comparación de las emisiones de GEI promedio de los procesos entre Codelco y la media nacional, año 2005 .....	66
Tabla 5-3: Comparación de emisiones de GEI de los procesos de Codelco utilizando GaBi con otras fuentes bibliográficas .....	68
Tabla 6-1: Consumo energético unitario de los productos de Codelco, en MJ/TMF Cu, año 2005 .....	70
Tabla 7-1: Comparación Consumos Energéticos de procesos en MJ/TMF Cu, año 2005 .....	84

Tabla 8-1: Factor de emisión promedio de fuentes eléctricas en Chile según GaBi, en tCO <sub>2</sub> e/GWh producida .....	90
Tabla 8-2: Factores de emisión del SING y SIC en tCO <sub>2</sub> e/GWh producida, período 2000-2009 .....	91
Tabla 8-3: Factores de Emisión de CO <sub>2</sub> de los combustibles según IPCC 1996 .....	93
Tabla 8-4: Factores de Emisión de CH <sub>4</sub> y N <sub>2</sub> O para la Industria según IPCC 1996.....	94
Tabla 8-5: Factores de Emisión total en tCO <sub>2</sub> e/TJ de los combustibles .....	95
Tabla 9-1: Producción de Molibdeno dentro de la Empresa en el período 2005-2009, en TMF Mo .....	97
Tabla 9-2: Producción de concentrado de cobre y concentrado de molibdeno en la Empresa por divisiones, año 2005 .....	99
Tabla 9-3: Emisión unitaria excluyendo e incorporando al concentrado de molibdeno producido en cada división de la Empresa, en kg CO <sub>2</sub> e/TMF, año 2005. Criterio de asignación por masa .....	100
Tabla 9-4: Precios promedios unitarios del concentrado de cobre y del concentrado de molibdeno, año 2005, en USD\$/TMF a precios del año .....	101
Tabla 9-5: Emisión unitaria del concentrado de cobre y el concentrado de molibdeno dentro de la Empresa por criterio de asignación por ventas, año 2005 .....	102
Tabla 9-6: Emisión unitaria del proceso de Tostación de Chuquicamata en la Empresa, en kg CO <sub>2</sub> e/TMF Mo .....	104
Tabla 9-7: Consumo energético unitario del proceso de Tostación de Chuquicamata en la Empresa, en MJ/TMF Mo .....	104
Tabla 9-8: Emisión unitaria del Óxido de Molibdeno de Chuquicamata en la Empresa, en kg CO <sub>2</sub> e/TMF Mo, año 2005 .....	105
Tabla 10-1: Producción de Cátodo EO de Chuquicamata y Cátodo EO de Radomiro Tomic en la Empresa, en TMF Cu .....	108
Tabla 10-2: Consumo energético unitario de la Hidrometalurgia de Chuquicamata desagregado en sus subprocesos, en MJ/TMF Cu, promedio ponderado para el período 2006-2009 .....	109

Tabla 10-3: Emisiones unitarias de GEI de la Hidrometalurgia de Chuquicamata desagregado en sus subprocesos, en kgCO <sub>2</sub> e/TMF Cu, promedio ponderado para el período 2006-2009 .....	110
Tabla 10-4: Consumo energético unitario de la Hidrometalurgia de Radomiro Tomic desagregado en sus subprocesos, en MJ/TMF Cu, promedio ponderado para el período 2006-2009 .....	111
Tabla 10-5: Emisiones unitarias de GEI de la Hidrometalurgia de Radomiro Tomic desagregado en sus subprocesos, en kgCO <sub>2</sub> e/TMF Cu, promedio ponderado para el período 2006-2009 .....	113
Tabla A-1: Emisiones unitarias de CO <sub>2</sub> e en el Concentrado de Cobre de Chuquicamata, en kg CO <sub>2</sub> e/TMF Cu, año 2005 .....	122
Tabla A-2: Emisiones unitarias de CO <sub>2</sub> e en el Cátodo ER de Chuquicamata, en kg CO <sub>2</sub> e/TMF Cu, año 2005 .....	123
Tabla A-3: Emisiones unitarias de CO <sub>2</sub> e en el Cátodo EO de Chuquicamata, en kg CO <sub>2</sub> e/TMF Cu, año 2005 .....	124
Tabla A-4: Emisiones unitarias de CO <sub>2</sub> e en el Cátodo EO de Radomiro Tomic, en kg CO <sub>2</sub> e/TMF Cu, año 2005 .....	125
Tabla A-5: Emisiones unitarias de CO <sub>2</sub> e en el Concentrado de Cobre de Salvador, en kg CO <sub>2</sub> e/TMF Cu, año 2005 .....	126
Tabla A-6: Emisiones unitarias de CO <sub>2</sub> e en el Cátodo ER de Salvador, en kg CO <sub>2</sub> e/TMF Cu, año 2005. Criterio 1 .....	127
Tabla A-7: Emisiones unitarias de CO <sub>2</sub> e en el Cátodo ER de Salvador, en kg CO <sub>2</sub> e/TMF Cu, año 2005. Criterio 2 .....	127
Tabla A-8: Emisiones unitarias de CO <sub>2</sub> e en el Cátodo EO de Salvador, en kg CO <sub>2</sub> e/TMF Cu, año 2005 .....	129
Tabla A-9: Emisiones unitarias de CO <sub>2</sub> e en el Concentrado de Cobre de Andina, en kg CO <sub>2</sub> e/TMF Cu, año 2005 .....	130
Tabla A-10: Emisiones unitarias de CO <sub>2</sub> e en el Concentrado de Cobre de El Teniente, en kg CO <sub>2</sub> e/TMF Cu, año 2005 .....	131

Tabla A-11: Emisiones unitarias de CO <sub>2</sub> e en el Cátodo ER de El Teniente/Ventanas, en kg CO <sub>2</sub> e/TMF Cu, año 2005 .....	132
Tabla A-12: Emisiones unitarias de CO <sub>2</sub> e en el RAF de El Teniente, en kg CO <sub>2</sub> e/TMF Cu, año 2005 .....	133
Tabla A-13: Composición de la matriz SING, período 2000-2009 .....	134
Tabla A-14: Composición de la matriz SIC, período 2000-2009 .....	134
Tabla A-15: Emisiones de GEI en la fabricación de insumos utilizados, año 2005 .....	135
Tabla B-1: Emisiones de GEI en el producto correspondientes a la Extracción en Minas Rajo, en kg CO <sub>2</sub> e por TMF Cu en el producto, año 2005 .....	137
Tabla B-2: Masa de cobre de Minas Rajo en productos de la Empresa, en TMF Cu, año 2005 .....	138
Tabla B-3: Emisiones de GEI en el mineral correspondientes a la Extracción en Minas Rajo, año 2005 .....	139
Tabla B-4: Masa de cobre de Minas Rajo en el mineral extraído, en TMF Cu, año 2005 .....	140
Tabla B-5: Emisiones de GEI en el concentrado correspondientes a la Extracción en Minas Subterráneas, en kg CO <sub>2</sub> e por TMF Cu en el concentrado, año 2005 .....	141
Tabla B-6: Masa de cobre de Minas Subterráneas en Concentrados de Cobre de la Empresa, en TMF Cu, año 2005 .....	142
Tabla B-7: Emisiones de GEI en el mineral correspondientes a la Extracción en Minas Subterráneas, año 2005 .....	143
Tabla B-8: Masa de cobre de Minas Subterráneas en el mineral extraído, en TMF Cu, año 2005 .....	143
Tabla B-9: Emisiones de GEI en el Concentrado de Cobre correspondientes al proceso de Concentración, en kg CO <sub>2</sub> e por TMF Cu en el Concentrado de Cobre, año 2005 ...	144
Tabla B-10: Masa de cobre en Concentrados de Cobre de la Empresa, en TMF Cu, año 2005 .....	145
Tabla B-11: Emisiones de GEI en el Cátodo EO correspondientes al proceso de Hidrometalurgia, en kg CO <sub>2</sub> e/TMF Cu en el Cátodo EO, año 2005 .....	146

Tabla B-12: Masa de cobre en Cátodos EO de la Empresa, en TMF Cu, año 2005 .....	146
Tabla B-13: Emisiones de GEI en el Ánodo correspondientes al proceso de Fundición y Planta de Ácido, en kg CO <sub>2</sub> e/TMF Cu en el Ánodo, año 2005 .....	147
Tabla B-14: Masa de cobre en Ánodos de la Empresa, en TMF Cu, año 2005 .....	148
Tabla B-15: Emisiones de GEI en el Cátodo ER correspondientes al proceso de Electro Refinería, en kg CO <sub>2</sub> e/TMF Cu en el Cátodo ER, año 2005 .....	149
Tabla B-16: Masa de cobre en Cátodos ER de la Empresa, en TMF Cu, año 2005 .....	149
Tabla B-17: Emisiones de GEI en el producto correspondientes al proceso de Servicios, en kg CO <sub>2</sub> e/TMF Cu en el producto, año 2005 .....	151
Tabla B-18: Masa de cobre en productos de venta final de la Empresa, en TMF Cu, año 2005 .....	152
Tabla C-1: Consumos unitarios de energía en el Concentrado de Cobre de Chuquicamata, en MJ/TMF Cu, año 2005 .....	153
Tabla C-2: Consumos unitarios de energía en el Cátodo ER de Chuquicamata, en MJ/TMF Cu, año 2005 .....	154
Tabla C-3: Consumos unitarios de energía en el Cátodo EO de Chuquicamata, en MJ/TMF Cu, año 2005 .....	156
Tabla C-4: Consumos unitarios de energía en el Cátodo EO de Radomiro Tomic, en MJ/TMF Cu, año 2005 .....	157
Tabla C-5: Consumos unitarios de energía en el Concentrado de Cobre de Salvador, en MJ/TMF Cu, año 2005 .....	159
Tabla C-6: Consumos unitarios de energía en el Cátodo ER de Salvador, en MJ/TMF_Cu, año 2005. Criterio 1 .....	160
Tabla C-7: Consumos unitarios de energía en el Cátodo ER de Salvador, en MJ/TMF_Cu, año 2005. Criterio 2 .....	161
Tabla C-8: Consumos unitarios de energía en el Cátodo EO de Salvador, en MJ/TMF_Cu, año 2005 .....	162
Tabla C-9: Consumos unitarios de energía en el Concentrado de Cobre de Andina, en MJ/TMF Cu, año 2005 .....	164

Tabla C-10: Consumos unitarios de energía en el Concentrado de Cobre de El Teniente, en MJ/TMF_Cu, año 2005 .....	165
Tabla C-11: Consumos unitarios de energía en el Cátodo ER de El Teniente/Ventanas, en MJ/TMF Cu, año 2005 .....	167
Tabla C-12: Consumos unitarios de energía en el RAF de El Teniente, en MJ/TMF Cu, año 2005 .....	168
Tabla C-13: Consumo energético en fabricación de insumos utilizados, año 2005 .....	170
Tabla D-1: Emisiones del Concentrado de Cobre de Chuquicamata, utilizando la expresión de emisiones unitarias del 2005 evaluada por la matriz eléctrica de cada año del período 2005-2009, en kg CO <sub>2</sub> e/TMF Cu .....	172
Tabla D-2: Emisiones del Cátodo ER de Chuquicamata, utilizando la expresión de emisiones unitarias del 2005 evaluada por la matriz eléctrica de cada año del período 2005-2009, en kg CO <sub>2</sub> e/TMF Cu .....	174
Tabla D-3: Emisiones del Cátodo EO de Chuquicamata, utilizando la expresión de emisiones unitarias del 2005 evaluada por la matriz eléctrica de cada año del período 2005-2009, en kg CO <sub>2</sub> e/TMF Cu .....	175
Tabla D-4: Emisiones del Cátodo EO de Radomiro Tomic, utilizando la expresión de emisiones unitarias del 2005 evaluada por la matriz eléctrica de cada año del período 2005-2009, en kg CO <sub>2</sub> e/TMF Cu .....	177
Tabla D-5: Emisiones del Concentrado de Cobre de Salvador, utilizando la expresión de emisiones unitarias del 2005 evaluada por la matriz eléctrica de cada año del período 2005-2009, en kg CO <sub>2</sub> e/TMF Cu .....	178
Tabla D-6: Emisiones del Cátodo ER de Salvador, utilizando la expresión de emisiones unitarias del 2005 evaluada por la matriz eléctrica de cada año del período 2005-2009, en kg CO <sub>2</sub> e/TMF Cu .....	180
Tabla D-7: Emisiones del Cátodo EO de Salvador, utilizando la expresión de emisiones unitarias del 2005 evaluada por la matriz eléctrica de cada año del período 2005-2009, en kg CO <sub>2</sub> e/TMF Cu .....	181

Tabla D-8: Emisiones del Concentrado de Cobre de Andina, utilizando la expresión de emisiones unitarias del 2005 evaluada por la matriz eléctrica de cada año del período 2005-2009, en kg CO <sub>2</sub> e/TMF Cu .....	183
Tabla D-9: Emisiones del Concentrado de Cobre de El Teniente, utilizando la expresión de emisiones unitarias del 2005 evaluada por la matriz eléctrica de cada año del período 2005-2009, en kg CO <sub>2</sub> e/TMF Cu .....	184
Tabla D-10: Emisiones del Cátodo ER de El Teniente/Ventanas, utilizando la expresión de emisiones unitarias del 2005 evaluada por la matriz eléctrica de cada año del período 2005-2009, en kg CO <sub>2</sub> e/TMF Cu .....	186
Tabla D-11: Emisiones del RAF de El Teniente, utilizando la expresión de emisiones unitarias del 2005 evaluada por la matriz eléctrica de cada año del período 2005-2009, en kg CO <sub>2</sub> e/TMF Cu .....	187
Tabla E-1: Detalle de consumos energéticos considerados para la Lixiviación en Hidrometalurgia de Chuquicamata de la Empresa, en MWh .....	189
Tabla E-2: Resumen Consumos Energéticos en la Lixiviación, Hidrometalurgia de Chuquicamata, en MWh .....	191
Tabla E-3: Detalle de consumos energéticos considerados para la Extracción por Solventes en Hidrometalurgia de Chuquicamata de la Empresa, en MWh .....	191
Tabla E-4: Resumen Consumos Energéticos en la Extracción por Solventes, Hidrometalurgia de Chuquicamata, en MWh .....	192
Tabla E-5: Detalle de consumos energéticos considerados para la Electro Obtención en Hidrometalurgia de Chuquicamata de la Empresa, en MWh .....	192
Tabla E-6: Resumen Consumos Energéticos en la Electro Obtención, Hidrometalurgia de Chuquicamata, en MWh .....	193
Tabla E-7: Detalle de consumos energéticos considerados para la Lixiviación en Hidrometalurgia de Radomiro Tomic de la Empresa, en MWh .....	194
Tabla E-8: Resumen Consumos Energéticos en la Lixiviación, Hidrometalurgia de Radomiro Tomic, en MWh .....	195

Tabla E-9: Detalle de consumos energéticos considerados para la Extracción por Solventes en Hidrometalurgia de Radomiro Tomic de la Empresa, en MWh .....	195
Tabla E-10: Resumen Consumos Energéticos en la Extracción por Solventes, Hidrometalurgia de Radomiro Tomic, en MWh .....	196
Tabla E-11: Detalle de consumos energéticos considerados para la Electro Obtención en Hidrometalurgia de Radomiro Tomic de la Empresa, en MWh .....	196
Tabla E-12: Resumen Consumos Energéticos en la Electro Obtención, Hidrometalurgia de Radomiro Tomic, en MWh .....	197
Tabla F-1: Consumos de la Tostadora de Chuquicamata, año 2006 .....	198
Tabla F-2: Consumos de la Tostadora de Chuquicamata, año 2007 .....	198
Tabla F-3: Consumos de la Tostadora de Chuquicamata, año 2008 .....	199
Tabla F-4: Consumos de la Tostadora de Chuquicamata, año 2009 .....	199

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3-1: Modelo en GaBi de producción del Cátodo ER en Chuquicamata .....	16
Figura 3-2: Modelo en GaBi del proceso de Extracción en Rajo Chuquicamata .....	17
Figura 3-3: Relación entre procesos y productos .....	22
Figura 4-1: Emisión total por tipo de producto en la Empresa con escenarios de matriz eléctrica de mayor GEI y de menor GEI, en kg CO <sub>2</sub> e/TMF Cu, año 2005.....	36
Figura 4-2: Emisiones de la Empresa desagregadas por tipo de fuente en tCO <sub>2</sub> e, año 2005 .....	40
Figura 4-3: Principales insumos emisores de GEI a nivel total de la Empresa, año 2005 .....	42
Figura 4-4: Bolas de acero utilizadas en la molienda .....	47
Figura 4-5: Saco con cal.....	48
Figura 4-6: Saco con ANFO .....	49
Figura 4-7: Arena de sílice.....	50
Figura 4-8: Camión .....	50
Figura 4-9: Saco con cemento.....	51
Figura 4-10: Rueda de camión minero.....	52
Figura 4-11: Agua oxigenada.....	52
Figura 4-12: Soda cáustica .....	53
Figura 4-13: Tablas de madera de pino.....	54
Figura 4-14: Participaciones porcentuales de los alcances incluyendo alcance III .....	56
Figura 4-15: Participaciones porcentuales de los alcances excluyendo alcance III .....	57
Figura 4-16: Factores de emisión de las matrices SING y SIC, según tipo de fuente, en tCO <sub>2</sub> e/GWh producida .....	62
Figura 5-1: Comparación de las emisiones promedio de los procesos entre Codelco y la media nacional, año 2005 .....	66
Figura 7-1: Comparación del consumo unitario de energía del proceso de Mina Rajo ...	73

Figura 7-2: Comparación del consumo unitario de energía del proceso de Mina Subterránea en MJ/TMF Cu en el mineral, año 2005 .....	74
Figura 7-3: Comparación del consumo unitario de energía del proceso de Concentración en MJ/TMF Cu en el concentrado, año 2005 .....	75
Figura 7-4: Comparación del consumo unitario de energía del proceso de Hidrometalurgia en MJ/TMF Cu en el cátodo EO, año 2005 .....	77
Figura 7-5: Comparación del consumo unitario de energía del proceso de Fundición en el Cátodo ER en MJ/TMF Cu, año 2005 .....	78
Figura 7-6: Comparación del consumo unitario de energía del proceso de Planta de Ácido en MJ/TMF Cu en el ánodo, año 2005 .....	79
Figura 7-7: Comparación del consumo unitario de energía del proceso de Electro Refinería en MJ/TMF Cu en el cátodo ER, año 2005 .....	80
Figura 7-8: Comparación del consumo unitario de energía del proceso de Servicios en MJ/TMF Cu en el concentrado de cobre, año 2005 .....	82
Figura 7-9: Comparación del consumo unitario de energía del proceso de Servicios en MJ/TMF Cu en el cátodo ER, año 2005 .....	82
Figura 7-10: Comparación del consumo unitario de energía del proceso de Servicios en MJ/TMF Cu en el cátodo EO, año 2005 .....	83
Figura 7-11: Comparación de consumos energéticos de procesos entre Codelco y la media nacional, en MJ/TMF Cu, año 2005 .....	85
Figura 8-1: Participaciones porcentuales de fuentes en el SING, período 2000-2009 ...	90
Figura 8-2: Participaciones porcentuales de fuentes en el SIC, período 2000-2009 .....	91
Figura 8-3: Factores de emisión del SIC y SING en tCO <sub>2</sub> e/GWh producida, período 2000-2009 .....	92
Figura 10-1: Participación porcentual de los subprocesos en el consumo de energía eléctrica de la Hidrometalurgia de Chuquicamata, valor promedio período 2006-2009 .....	109

Figura 10-2: Participación porcentual de los subprocesos en el consumo de combustible (en términos de energía) de la Hidrometalurgia de Chuquicamata, valor promedio período 2006-2009 .....	109
Figura 10-3: Participación porcentual de los subprocesos en el consumo total de energía de la Hidrometalurgia de Chuquicamata, valor promedio período 2006-2009 .....	110
Figura 10-4: Participación porcentual de los subprocesos en las emisiones totales de GEI de la Hidrometalurgia de Chuquicamata, valor promedio período 2006-2009 .....	110
Figura 10-5: Participación porcentual de los subprocesos en el consumo de energía eléctrica de la Hidrometalurgia de Radomiro Tomic, valor promedio período 2006-2009 .....	112
Figura 10-6: Participación porcentual de los subprocesos en el consumo de combustible (en términos de energía) de la Hidrometalurgia de Radomiro Tomic, valor promedio período 2006-2009 .....	112
Figura 10-7: Participación porcentual de los subprocesos en el consumo total de energía de la Hidrometalurgia de Radomiro Tomic, valor promedio período 2006-2009 .....	113
Figura 10-8: Participación porcentual de los subprocesos en las emisiones totales de GEI de la Hidrometalurgia de Radomiro Tomic, valor promedio período 2006-2009 .....	114
Figura A-1: Participación porcentual de los procesos en la emisión de CO <sub>2</sub> e del Concentrado de Cobre de Chuquicamata, año 2005 .....	122
Figura A-2: Participación porcentual de los procesos en la emisión de CO <sub>2</sub> e del Cátodo ER de Chuquicamata, año 2005 .....	123
Figura A-3: Participación porcentual de los procesos en la emisión de CO <sub>2</sub> e del Cátodo EO de Chuquicamata, año 2005 .....	124
Figura A-4: Participación porcentual de los procesos en la emisión de CO <sub>2</sub> e del Cátodo EO de Radomiro Tomic, año 2005 .....	125
Figura A-5: Participación porcentual de los procesos en la emisión de CO <sub>2</sub> e del Concentrado de Cobre de Salvador, año 2005 .....	126
Figura A-6: Participación porcentual de los procesos en la emisión de CO <sub>2</sub> e del Cátodo ER de Salvador, año 2005. Criterio 2 .....	128

Figura A-7: Participación porcentual de los procesos en la emisión de CO <sub>2</sub> e del Cátodo EO de Salvador, año 2005 .....	129
Figura A-8: Participación porcentual de los procesos en la emisión de CO <sub>2</sub> e del Concentrado de Cobre de Andina, año 2005 .....	130
Figura A-9: Participación porcentual de los procesos en la emisión de CO <sub>2</sub> e del Concentrado de Cobre de El Teniente, año 2005 .....	131
Figura A-10: Participación porcentual de los procesos en la emisión de CO <sub>2</sub> e del Cátodo ER de El Teniente/Ventanas, año 2005 .....	132
Figura A-11: Participación porcentual de los procesos en la emisión de CO <sub>2</sub> e del RAF de El Teniente, año 2005 .....	133
Figura C-1: Participación porcentual de los procesos en el consumo de energía eléctrica del Concentrado de Cobre de Chuquicamata, año 2005 .....	153
Figura C-2: Participación porcentual de los procesos en el consumo de combustible (en términos de energía) del Concentrado de Cobre de Chuquicamata, año 2005 .....	154
Figura C-3: Participación porcentual de los procesos en el consumo de energía eléctrica del Cátodo ER de Chuquicamata, año 2005.....	155
Figura C-4: Participación porcentual de los procesos en el consumo de combustible (en términos de energía) del Cátodo ER de Chuquicamata, año 2005.....	155
Figura C-5: Participación porcentual de los procesos en el consumo de energía eléctrica del Cátodo EO de Chuquicamata, año 2005 .....	156
Figura C-6: Participación porcentual de los procesos en el consumo de combustible (en términos de energía) del Cátodo EO de Chuquicamata, año 2005 .....	157
Figura C-7: Participación porcentual de los procesos en el consumo de energía eléctrica del Cátodo EO de Radomiro Tomic, año 2005 .....	158
Figura C-8: Participación porcentual de los procesos en el consumo de combustible (en términos de energía) del Cátodo EO de Radomiro Tomic, año 2005 .....	158
Figura C-9: Participación porcentual de los procesos en el consumo de energía eléctrica del Concentrado de Cobre de Salvador, año 2005 .....	159

Figura C-10: Participación porcentual de los procesos en el consumo de combustible (en términos de energía) del Concentrado de Cobre de Salvador, año 2005 .....	160
Figura C-11: Participación porcentual de los procesos en el consumo de energía eléctrica del Cátodo ER de Salvador, año 2005. Criterio 2 .....	161
Figura C-12: Participación porcentual de los procesos en el consumo de combustible (en términos de energía) del Cátodo ER de Salvador, año 2005. Criterio 2 .....	162
Figura C-13: Participación porcentual de los procesos en el consumo de energía eléctrica del Cátodo EO de Salvador, año 2005 .....	163
Figura C-14: Participación porcentual de los procesos en el consumo de combustible (en términos de energía) del Cátodo EO de Salvador, año 2005 .....	163
Figura C-15: Participación porcentual de los procesos en el consumo de energía eléctrica del Concentrado de Cobre de Andina, año 2005 .....	164
Figura C-16: Participación porcentual de los procesos en el consumo de combustible (en términos de energía) del Concentrado de Cobre de Andina, año 2005 .....	165
Figura C-17: Participación porcentual de los procesos en el consumo de energía eléctrica del Concentrado de Cobre de El Teniente, año 2005 .....	166
Figura C-18: Participación porcentual de los procesos en el consumo de combustible (en términos de energía) del Concentrado de Cobre de El Teniente, año 2005 .....	166
Figura C-19: Participación porcentual de los procesos en el consumo de energía eléctrica del Cátodo ER de El Teniente/Ventanas, año 2005 .....	167
Figura C-20: Participación porcentual de los procesos en el consumo de combustible (en términos de energía) del Cátodo ER de El Teniente/Ventanas, año 2005 .....	168
Figura C-21: Participación porcentual de los procesos en el consumo de energía eléctrica del RAF de El Teniente, año 2005 .....	169
Figura C-22: Participación porcentual de los procesos en el consumo de combustible (en términos de energía) del RAF de El Teniente, año 2005 .....	169
Figura D-1: Emisiones del Concentrado de Cobre de Chuquicamata, utilizando la expresión de emisiones unitarias del 2005 evaluada por la matriz eléctrica de cada año del período 2005-2009, en kg CO <sub>2</sub> e/TMF Cu .....	173

Figura D-2: Emisiones del Cátodo ER de Chuquicamata, utilizando la expresión de emisiones unitarias del 2005 evaluada por la matriz eléctrica de cada año del período 2005-2009, en kg CO <sub>2</sub> e/TMF Cu .....	174
Figura D-3: Emisiones del Cátodo EO de Chuquicamata, utilizando la expresión de emisiones unitarias del 2005 evaluada por la matriz eléctrica de cada año del período 2005-2009, en kg CO <sub>2</sub> e/TMF Cu .....	176
Figura D-4: Emisiones del Cátodo EO de Radomiro Tomic, utilizando la expresión de emisiones unitarias del 2005 evaluada por la matriz eléctrica de cada año del período 2005-2009, en kg CO <sub>2</sub> e/TMF Cu .....	177
Figura D-5: Emisiones del Concentrado de Cobre de Salvador, utilizando la expresión de emisiones unitarias del 2005 evaluada por la matriz eléctrica de cada año del período 2005-2009, en kg CO <sub>2</sub> e/TMF Cu .....	179
Figura D-6: Emisiones del Cátodo ER de Salvador, utilizando la expresión de emisiones unitarias del 2005 evaluada por la matriz eléctrica de cada año del período 2005-2009, en kg CO <sub>2</sub> e/TMF Cu .....	180
Figura D-7: Emisiones del Cátodo EO de Salvador, utilizando la expresión de emisiones unitarias del 2005 evaluada por la matriz eléctrica de cada año del período 2005-2009, en kg CO <sub>2</sub> e/TMF Cu .....	182
Figura D-8: Emisiones del Concentrado de Cobre de Andina, utilizando la expresión de emisiones unitarias del 2005 evaluada por la matriz eléctrica de cada año del período 2005-2009, en kg CO <sub>2</sub> e/TMF Cu .....	183
Figura D-9: Emisiones del Concentrado de Cobre de El Teniente, utilizando la expresión de emisiones unitarias del 2005 evaluada por la matriz eléctrica de cada año del período 2005-2009, en kg CO <sub>2</sub> e/TMF Cu .....	185
Figura D-10: Emisiones del Cátodo ER de El Teniente/Ventanas, utilizando la expresión de emisiones unitarias del 2005 evaluada por la matriz eléctrica de cada año del período 2005-2009, en kg CO <sub>2</sub> e/TMF Cu .....	186

Figura D-11: Emisiones del RAF de El Teniente, utilizando la expresión de emisiones unitarias del 2005 evaluada por la matriz eléctrica de cada año del período 2005-2009, en kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu ..... 188

## RESUMEN

En esta Tesis se analizan las emisiones de GEI y los consumos de energía de los productos y procesos de una gran empresa de la minería del cobre en Chile. Se trabajó con datos de Codelco del año 2005 utilizando GaBi el cual es un software para hacer Análisis de Ciclo de Vida.

Como resultados de esta análisis se obtuvo que a nivel de Empresa las emisiones de GEI propias del uso de combustibles representaron el 23%, las del consumo de electricidad el 65%, y las de la fabricación y transporte de insumos el 12%. A nivel de productos, los insumos representaron en promedio 521 kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu en el cátodo ER, y 97 kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu en el cátodo EO.

Las mayores opciones de reducción de las emisiones de GEI tienen que ver con la disminución del factor de emisión de las matrices eléctricas, lo que está fuera del control directo de la Industria Minera. Utilizando una matriz eléctrica 100% térmica a diesel en lugar de una matriz 100% hidro, el concentrado de cobre en la Empresa aumenta su emisión unitaria total en 3,9 veces, el cátodo ER en 3,4 veces, y el cátodo EO en 5,1 veces.

En esta Tesis se estiman también las emisiones de GEI y consumos energéticos de procesos no cuantificados por Codelco utilizando GaBi. Se estima la huella de carbono del óxido de molibdeno, la cual resultó ser en promedio para el período 2006-2009 de 3,5 tCO<sub>2</sub>e/TMF Mo, considerando el criterio de asignación por masa para el concentrado de molibdeno. El proceso de Tostación del concentrado de molibdeno aportó 1,1 tCO<sub>2</sub>e/TMF Mo. Además se desagregan las emisiones de GEI y consumos energéticos de las dos hidrometalurgias de la División Norte en sus subprocesos, donde la electro obtención representó un 79% del consumo energético en la hidrometalurgia de Chuquicamata, y un 91% del consumo energético en la hidrometalurgia de Radomiro Tomic.

## ABSTRACT

In this thesis the GHG emissions from products and processes of an important copper mining enterprise in Chile are analyzed. The work is done with models provided by Codelco developed for the GaBi Life Cycle Assessment software. The results of 11 products modeled for the year 2005 were analyzed; these products represent the majority of the copper output of Codelco. The GHG emissions and final energy consumption for each product disaggregated by processes, and each one of these processes disaggregated in fuel consumption (scope I), electricity (scope II), and inputs (scope III) are presented.

At company level, GHG emissions from fuel use accounted for 23%, electricity consumption for 65%, and manufacturing and transportation of inputs for the remaining 12%. In terms of products, inputs accounted an average of 521 kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu in the ER cathode, and 97 kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu in the SX-EW cathode.

The electric energy mix has a significant influence on GHG emissions. With the actual average technology in Chile, electric energy provided by 100% diesel thermal has an emission factor 47 times of an electric energy provided by 100% hydropower. The major alternatives for reducing the carbon footprint are not under control of the copper industry, and are related to the reduction of the emission factor of the energy mix.

In this thesis the GHG emissions and energy consumption of processes not modeled by Codelco in GaBi are also estimated. Using the mass allocation criteria for the molybdenum concentrate the carbon footprint of molybdenum oxide averaged an amount of 3,5 tCO<sub>2</sub>e/TMF Mo for the period 2006-2009. The process of roasting of molybdenum concentrates provided 1,1 tCO<sub>2</sub>e/TMF Mo. The GHG emissions and energy consumption of the two North Division hydrometallurgy processes where disaggregated, where the electrowinning accounted for 79% of energy consumption in Chuquicamata hydrometallurgy, and 91% of energy consumption in Radomiro Tomic hydrometallurgy.

## 1. INTRODUCCIÓN

La huella de carbono es la medida de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) de un determinado ente durante un período de tiempo. La UK Carbon Trust, organización sin fines de lucro y asesora del gobierno británico en políticas de reducción de carbono, posee una definición de huella de carbono bastante citada la cual es *“la totalidad de gases de efecto invernadero emitidos por efecto directo o indirecto de un individuo, organización, evento o producto”*.

El interés y preocupación por el fenómeno del calentamiento global va en aumento a nivel planetario. De manera creciente los distintos mercados en el mundo, sobre todo los de países desarrollados, comienzan a exigir conocimiento acerca del valor de la huella de carbono propia de los productos y servicios que consumen, de manera de considerar también esta variable al momento de elegir a quién comprar.

El cobre es un commodity que está sujeto a estas nuevas exigencias de la comunidad internacional. A su vez el cobre es uno de pilares de la economía chilena. El año 2008 esta industria aportó 12.992 MMUSD al Fisco, correspondientes al 26,8% del total de los ingresos fiscales ese año (Larroulet, 2009). De ese aporte, a Codelco le correspondieron 6.976 MMUSD, correspondientes al 53,7% del aporte fiscal de esta industria (Larroulet, 2009).

En segundo lugar a nivel nacional aparece el molibdeno como el mineral más exportado. El año 2008 representó el 5,2% de todas las exportaciones del país (COCHILCO, 2010). El molibdeno es el principal co-producto de la Industria del Cobre en Chile, y también está sujeto a las nuevas exigencias sobre conocimiento y reporte de su huella de carbono. Al producirse como co-producto puede representar a futuro oportunidades en relación a obtención de créditos de emisiones de GEI, por lo cual resulta interesante conocer su huella de carbono.

Conscientes de la importancia del cobre para el país, y al mismo tiempo de la necesidad de adaptarse a las nuevas exigencias del mercado internacional, las empresas de la minería del cobre en Chile se han esmerado en estimar y reportar la huella de carbono de sus procesos y productos.

### **1.1 Gases de efecto invernadero**

Los gases de efecto invernadero (GEI) son aquellos gases presentes en la atmósfera que tienen la propiedad de absorber las radiaciones infrarrojas emitidas por el suelo que ha sido calentado por la luz solar, ocasionando el efecto propio de un invernadero pero a escala global, aumentando la temperatura media sobre la superficie terrestre. Si bien el efecto invernadero es necesario para la existencia de la vida en la Tierra, el problema surge hoy por la velocidad con la que está aumentando las concentraciones de GEI, lo que está generando rápidos cambios en los patrones climáticos y por lo tanto de hábitat de las especies vivientes y del ser humano.

Los GEI poseen distintos potenciales de calentamiento global (PCG), y se miden en términos del PCG de una molécula de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). El dióxido de carbono, el metano ( $\text{CH}_4$ ) y el óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) constituyen los principales gases causantes del calentamiento global. El  $\text{CH}_4$  posee un PCG de 21 a un plazo de 100 años, mientras que el del  $\text{N}_2\text{O}$  es de 310 a 100 años (IPCC 1996). Estos tres gases contribuyeron el 2005 con el 99% de las emisiones de GEI a nivel mundial con PCG definido (CAIT, 2010). El 1% de las emisiones restantes fueron causadas por los gases artificiales. Los gases artificiales poseen los PCG más altos, con un rango de 140 a 11.700 para los HFC dependiendo el tipo, de 6.500 a 9.200 para los PFC dependiendo el tipo, y de 23.900 para el  $\text{SF}_6$  (IPCC 1996, todos a un horizonte de 100 años). Sin embargo la emisión de los gases artificiales es comparativamente muy pequeña, contribuyendo en un porcentaje pequeño al fenómeno del calentamiento global.

Existen otros GEI que no poseen un PCG definido. Entre ellos se encuentran los precursores del ozono ( $O_3$ ) que son el monóxido de carbono (CO), los óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ) y los compuestos orgánicos volátiles no metánicos (COVNM). También se encuentra el dióxido de azufre ( $SO_2$ ) el cual tiene un PCG negativo, es decir su presencia contribuye a disminuir la temperatura global, pero aún sin un valor definido en relación al  $CO_2$ . Según las pautas del IPCC 1996 e IPCC 2006, los países también deben contabilizar las emisiones de los gases sin PCG definido de manera de incorporarlos en la contabilidad de la huella de carbono una vez que se definan PCG para ellos.

## **1.2 Grados de alcance de la huella de carbono**

Existen tres grados de alcance (denominados *scope* en inglés) para desagregar la huella de carbono de un ente según el grado de control que se tiene en la emisión. El alcance I se refiere a las emisiones directas o controlables. En el caso de una organización corresponden a todas aquellas emisiones producidas en procesos internos al sistema y por lo tanto manejables. Por otro lado las huellas de carbono de alcance II y de alcance III corresponden a las emisiones indirectas o no controlables. El alcance II se refiere a las emisiones de la generación de la energía eléctrica y calorífica consumidas por la organización (salvo en el caso que estas energías fuesen generadas por la propia organización, lo que correspondería a alcance I). El alcance III se refiere a las emisiones propias de la fabricación y transporte de los insumos utilizados para el funcionamiento de la organización, en la medida que estos insumos sean realizados por terceros. Estos insumos pueden ser tanto productos como servicios.

La estimación de la huella de carbono generalmente considera las emisiones de alcance I y de alcance II. Las emisiones de alcance III en la mayor parte de las estimaciones no

son consideradas. Para el caso de la Industria del Cobre en Chile hasta la fecha la única empresa que ha reportado emisiones de alcance III en sus estimaciones es Collahuasi.

### **1.2.1 Huella de carbono de alcance I**

Las emisiones de GEI de alcance I son aquellas resultantes de las actividades directamente controladas por una organización. Existen una serie de procesos que pueden encontrarse dentro de una organización y que emiten GEI, tales como la quema de combustibles, las emisiones fugitivas, cambios del uso del suelo, la generación de metano y óxido nitroso proveniente de actividades agrícola-ganaderas, las emisiones propias de la descomposición y manejo de residuos sólidos y líquidos, la calcinación, la fermentación, entre otros.

En el caso de la minería del cobre, la contabilización de emisiones de alcance I se reduce a la quema de los combustibles utilizados en las faenas. El uso de combustibles se presenta en el transporte de minerales, materiales y personal; en los procesos mineros y metalúrgicos; y en la administración y campamentos (servicios en general). También existen emisiones de alcance I provenientes de procesos distintos a la quema de combustibles, tales como el CO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub> provenientes de reacciones asociadas a la fusión, conversión y refinado en las fundiciones; el SO<sub>2</sub> de la tostación del concentrado de molibdeno; y las emisiones fugitivas de CH<sub>4</sub> provenientes del uso de gas natural. Estas emisiones son pequeñas en relación a las provenientes de la combustión, y constituye una tarea aún no realizada el que no estén siendo estimadas y contabilizadas de manera de precisar aún más las emisiones de alcance I en esta industria (en esta Tesis tampoco se contabilizan).

### 1.2.2 Huella de carbono de alcance II

Las emisiones de alcance II corresponden a las emisiones propias de la generación de la energía eléctrica y calorífica consumida dentro de una organización. En el caso de la Industria del Cobre estas emisiones son las que tienen mayor relevancia debido a que la electricidad constituye el mayor consumo energético (COCHILCO, 2010). Además el consumo de electricidad en la industria es intenso en relación al consumo total de electricidad del país. El año 2008, la Industria del Cobre en Chile consumió el 78% de la energía eléctrica del SING y el 17% del SIC, representando en su conjunto casi un tercio del consumo eléctrico nacional (CNE, 2008).

Las emisiones de alcance II se pueden desagregar en dos partes. En primer lugar, en el combustible quemado en las centrales térmicas cuya energía es transformada en energía eléctrica. En segundo lugar y con una contribución menor, en el combustible necesario para el funcionamiento de la Industria de la Energía, que no es lo mismo. Ambas quemas de combustible son distinguidas en los Balances Energéticos desarrollados por la CNE, donde se las agrupa en combustibles para *Centros de Transformación* (transformación energética), y en combustibles para *Sector Energía* (funcionamiento de la industria energética).

El factor de emisión de la producción de una unidad de electricidad proveniente de una matriz eléctrica depende de la composición del conjunto de centrales de ésta. Para el cálculo simplificado de alcance II, se determina un factor de emisión promedio para todo un año considerando la generación de electricidad proveniente de cada central durante todo el período. Sin embargo un cálculo más preciso requeriría del factor de emisión de cada hora durante el año, y del consumo de electricidad por parte del consumidor durante cada una de esas horas. El factor de emisión depende de la demanda total durante un instante. En efecto, durante los momentos de menor demanda generan fundamentalmente centrales de base, que son las de menor costo marginal y, en general,

de menores emisiones de GEI por ser principalmente centrales hidráulicas. A medida que aumenta la demanda empiezan a generar electricidad centrales de mayor costo marginal y con mayores emisiones de GEI. Los factores de emisión horarios dependen del parque de centrales que están generando en cada hora. Luego, el factor de emisión de la producción de electricidad, según hora y mes, se calcula como:

$$FE_{P\ h,m} = \frac{\sum_{c=1}^C EG_{c,h,m} FE_{P\ c}}{EG_{h,m}}$$

Donde  $EG_{c,h,m}$  es la energía generada por la central  $c$  durante la hora  $h$  y el mes  $m$ ,  $FE_{P\ c}$  es el factor de emisión de la central  $c$ , expresado en  $[\frac{tCO_2e}{GWh}]$ , y  $EG_{h,m}$  es la energía total generada durante la hora  $h$  y el mes  $m$ . La energía eléctrica total generada por un sistema durante una hora se calcula como:

$$EG_{h,m} = \sum_{c=1}^C EG_{c,h,m}$$

Los factores de emisión deben ser corregidos debido a las pérdidas de transporte y distribución. Estos se pueden estimar con la información disponible en la CNE y las empresas de transporte y distribución de electricidad. El factor de emisión de una unidad de electricidad consumida por una organización se calcula como:

$$FE_{C\ h,m} = \frac{FE_{P\ h,m}}{(1 - \%p)_{h,m}}$$

Donde  $FE_{P\ h,m}$  es el factor de emisión de producción de electricidad de la hora  $h$  y el mes  $m$ , expresado en  $[\frac{tCO_2e}{GWh}]$ , y  $\%p$  es el porcentaje de pérdida de electricidad dentro de la red de transmisión y distribución de la hora  $h$  y el mes  $m$ .

Como se señaló, con el fin de simplificar el cálculo de las emisiones de alcance II, el factor de emisión de producción de un sistema eléctrico que se suele utilizar corresponde al del total del sistema transcurrido un año, el cual es corregido por el porcentaje de pérdida de transmisión total del sistema durante el período. Luego este factor es multiplicado por el consumo total de la organización durante el mismo período. Esta simplificación es favorable (en términos de la huella de carbono contabilizada) para aquellos consumidores que consumen intensamente durante horarios punta, y desfavorable para aquellos consumidores que consumen poco o no consumen durante los horarios de mayor demanda.

### **1.2.3 Huella de carbono de alcance III**

La huella de carbono de alcance III tiene relación con las emisiones de gases efecto invernadero propias de la fabricación y transporte de los insumos consumidos por una organización pero que son producidos por terceros. Un preciso cálculo de este alcance requiere de conocer la huella de carbono de cada uno de los productos o servicios que son utilizados, tanto de su producción como de su traslado desde el despacho hasta donde es consumido. En la práctica son pocos los proveedores que poseen los cálculos de la huella de carbono de sus productos o servicios, por lo que para el cálculo de este alcance se suelen tomar valores de huella de carbono promedios a nivel mundial o de países de características similares para los distintos productos o servicios consumidos.

De acuerdo al protocolo de gases de efecto invernadero “*Greenhouse Gas Protocol*” (GHG Protocol), desarrollado por el World Resources Institute en conjunto con World Business Council for Sustainable Development, el reporte de las emisiones de esta categoría es opcional “*pero ofrece la oportunidad de ser innovadores en la gestión de los gases de efecto invernadero*” (World Resources Institute, 2004) lo que puede

traducirse en una ventaja comparativa para las organizaciones o empresas que las reportan.

La inclusión de las emisiones de alcance III permite completar el análisis de ciclo de vida de la huella de carbono. Esto se debe a que toma en consideración todas las emisiones asociados a los insumos productivos y a la gestión de los residuos, necesarios para el desarrollo de los productos o servicios que genera la organización.

Muchas veces el quedarse en el alcance II suele ser limitante, porque puede ocurrir que las emisiones asociadas a los insumos y al manejo de residuos pueden ser mayores a las asociadas a los otros dos niveles juntos. Es aquí donde muchas empresas tienen la oportunidad de diferenciarse, seleccionando proveedores con una huella de carbono menor, implementando sistemas de reciclado, reutilización, generación de co-productos, etc. En la siguiente tabla se analiza el caso ficticio de dos embotelladoras, donde la primera utiliza solo embases desechables y la segunda solo retornables.

Tabla 1-1: Diferencias entre 2 embotelladoras producto de la consideración del alcance III <sup>1</sup>

<b>Alcances Huella de carbono</b>	<b>Embotelladora 1 Botellas desechables</b>	<b>Embotelladora 2 Botellas retornables</b>
Botella por alcance I	138 g CO <sub>2</sub> e	198 g CO <sub>2</sub> e
Botella por alcance II	23 g CO <sub>2</sub> e	25 g CO <sub>2</sub> e
Botella por alcance III	353 g CO <sub>2</sub> e	24 g CO <sub>2</sub> e
Huella de carbono Total	<b>514 g CO<sub>2</sub>e</b>	<b>247 g CO<sub>2</sub>e</b>

---

<sup>1</sup> Fuente: Elaboración propia

Se puede observar que si solo se considera los alcances I y II la huella de carbono resulta menor en la embotelladora que utiliza botellas desechables en lugar de botellas retornables. Sin embargo, al considerar el insumo botella, la huella total es menor con el uso de botellas retornables. Si bien la elaboración de una botella retornable tiene una intensidad de consumo de energía mayor al de una desechable, ocurre que si se recuperan el 90% de los envases y solo lavándolos se pueden volver a utilizar, evitando así gran parte las emisiones asociadas a la disposición final y especialmente a la compra de una nueva botella de vidrio.

Si bien muchas veces esta es la parte más difícil del cálculo de una huella de carbono, no deja de ser importante. A la vez, la experiencia internacional ha resuelto en gran medida este problema, ya que si bien se recomienda priorizar la utilización de información primaria o específica (asociada a los productos efectivamente utilizados), existen bases de datos secundarias o genéricas, que si bien su información puede variar del valor efectivo, sí son muy útiles para ahorrar tiempo de análisis. Estas bases de datos las proveen los softwares para el Análisis de Ciclo de Vida como SimaPro, GaBi, entre otros. Es importante destacar que estos softwares permiten calcular no solo la huella de carbono, sino también el uso total de energía, potencial de destrucción de ozono, potencial de eutroficación, toxicidad ecológica, toxicidad para el ser humano, generación de smog, y una serie de otros indicadores ambientales.

Para el cálculo hasta alcance II no resulta necesario un software de análisis de ciclo de vida. Esta situación cambia para la inclusión del alcance III, especialmente si los proveedores directos no han calculado su propia huella de carbono hasta el alcance III.

### **1.3 Instrumentos de análisis computacionales para la huella de carbono**

A continuación se da una breve descripción de las herramientas computacionales que se utilizan hoy para el cálculo de huella de carbono, todas de nivel más sofisticado que Microsoft Excel.

- **Analytica**

Analytica es un software desarrollado por Lumina. Es una herramienta visual que permite la creación, el análisis y la comunicación de modelos de decisión. Utiliza diagramas de influencia, que permiten crear el modelo de manera intuitiva. Permite el manejo de información de manera multidimensional, y además permite evaluar de manera eficiente el riesgo y la incertidumbre utilizando modelación. Además permite realizar la modelación de manera modular por lo que es una ventaja para incorporar fácilmente información al modelo. Por ejemplo, el precio proyectado de los energéticos puede ser modelado de manera interna o también puede ser ingresado por medio de una base datos como datos exógenos para una fácil manipulación de terceros en caso de que se requiera.

- **GaBi**

GaBi, desarrollado por PE INTERNATIONAL, es uno de los principales softwares para el Análisis del ciclo de vida (LCA). Es utilizado para la contabilidad de GEI, Benchmarking, rendimiento energético de productos y de compañías, entre otros indicadores ambientales y sociales. GaBi es ampliamente utilizado para los estudios de LCA y para la ayuda de decisión en la industria y en institutos de investigación de LCA. El programa permite crear los modelos basados en el encadenamiento de distintos procesos. Además de las funciones básicas de LCI, análisis de datos, cálculo de impacto, etc., integra funcionalidad del parámetro para crear sistemas flexibles incluyendo efectos de la circularidad. Para un análisis detallado se puede variar los parámetros y realizar un análisis de la sensibilidad. La importación y la exportación de datos en GaBi se realizan usando el formato de Ecospolo o Excel. En

cuanto a las desventajas, está la característica de “caja negra” del software ya que mucha información y parámetros utilizados no son develados ni especificados.

- **SimaPro**

SimaPro es un programa desarrollado por la empresa holandesa PRé Consultants, que permite realizar Análisis de Ciclo de Vida (LCA), siendo uno de los más difundidos a nivel mundial. Mediante el uso de bases de datos de inventario propias (creadas por el usuario) y/o bibliográficas (BUWAL, IDEMAT, ETH, IVAM), permite calcular tanto la huella de carbono como otros indicadores ambientales asociados al LCA de un producto, servicio u organización.

SimaPro ofrece una herramienta profesional para almacenar, analizar y realizar un seguimiento del rendimiento ambiental de los productos y servicios. Con esta herramienta se facilita el análisis y la representación gráfica de ciclos complejos de un modo sistemático y transparente. SimaPro se caracteriza por tener una interfaz intuitiva, capacidad de modelaje sencillo con parámetros y análisis de escenarios, LCA híbrido con entradas y salidas para la información, conexión directa con Excel o bases de datos ASP, y cálculos de evaluación de impacto directo en cada etapa de su modelo. Todos los resultados son mostrados en una sola ventana de ser conveniente. Permite realizar también análisis de resultados interactivos, agrupación de los resultados, análisis de puntos débiles, realizar vastas opciones de filtraciones para todos los resultados, y posibilidad de análisis de escenarios complejos de tratamiento de desechos y reciclaje.

- **LEAP**<sup>2</sup>

---

<sup>2</sup> En base a Di Sbroiavacca, N. (2009): "El Modelo LEAP, principales características y especificación para la prospectiva y mitigación".

LEAP es un software desarrollado por el Stockholm Environment Institute (SEI-US). Es un software diseñado específicamente para un análisis avanzado de las emisiones del sector energía. Incorpora en su estructura una serie de herramientas de planificación energética. Actualizado por el SEI-US y por una serie de instituciones académicas internacionales, el modelo posee más de 4.000 usuarios en todo el mundo, distribuidos en más de 160 países. Ha sido seleccionado por 85 países no Anexo I para llevar a cabo estudios de mitigación GEI.

LEAP se enmarca dentro del conjunto de modelos denominados de *Simulación con Coeficientes Técnicos*. En lugar de simular decisiones que supondría representar la racionalidad de los consumidores y productores o buscar una solución óptima, usa explícitamente cálculos de salidas de dichas decisiones y examina las implicancias de un escenario. La lógica global del LEAP es clara, lo que hace que el modelo sea transparente. Esto le posibilita al usuario representar fácilmente el sistema energético a analizar, y de ese modo visualizar claramente su funcionamiento e identificar las implicancias de los escenarios planteados, del tipo “qué pasaría si” (“What if”), así como los impactos derivados de cambios estructurales.

Las ventajas más importantes de LEAP son su flexibilidad y facilidad de uso, permitiéndole al usuario pasar rápidamente del planteo de políticas energéticas y ambientales al análisis de sus efectos sin tener que utilizar modelizaciones complejas, y analizar los impactos de cambios estructurales.

El software utilizado para el desarrollo de esta Tesis es GaBi. Entre las razones de su elección están su funcionalidad y gran base datos, así como su disposición gratuita para los alumnos dentro del Centro de Minería de la PUC.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo principal**

Analizar las emisiones de GEI de los productos de una empresa de la gran minería del cobre en Chile utilizando el programa computacional GaBi, comparando los resultados obtenidos con otras fuentes bibliográficas.

### **2.2 Objetivos específicos**

1. Estimar las emisiones de GEI y consumo de energía de los productos de cobre de la Empresa, de manera desagregada por procesos, y estas a su vez desagregadas por consumo de combustible, electricidad, e insumos.
2. Comparar las emisiones promedio de los procesos de la Empresa con otras fuentes bibliográficas, reconociendo las diferencias en las metodologías y factores de emisión utilizados.
3. Comparar el consumo energético de los distintos procesos entre divisiones dentro de la Empresa, y luego los valores promedios de los procesos con otras fuentes bibliográficas.
4. Desarrollo de nuevos cálculos: huella de carbono y consumo energético de la producción de óxido de molibdeno en la Empresa, y huella de carbono y consumo energético del proceso de Hidrometalurgia desagregado en sus subprocesos.

**PARTE I: ANÁLISIS DE LAS EMISIONES DE GEI Y CONSUMO DE  
ENERGÍA DE LOS PRODUCTOS Y PROCESOS MODELADOS POR  
CODELCO UTILIZANDO GABI**

### **3. MARCO TEÓRICO PARTE I**

En esta Tesis se realiza un análisis de las emisiones de GEI y de los consumos energéticos finales tanto de los productos como procesos de una gran empresa de la minería del cobre en Chile. Esta empresa es Codelco, la cual facilitó los datos de 11 de sus productos para ser modelados en el programa GaBi el cual es un software para hacer Análisis de Ciclo de Vida. En esta primera parte de la Tesis se realiza el análisis a partir de estos datos otorgados por Codelco para ser utilizados con GaBi.

El programa GaBi posee una enorme base de datos que permite estimar distintos indicadores ambientales. El programa hace correr un modelo determinado, por ejemplo, la producción de un cátodo ER de cierta división, y arroja el indicador ambiental asociado que se le indique, por ejemplo la huella de carbono.

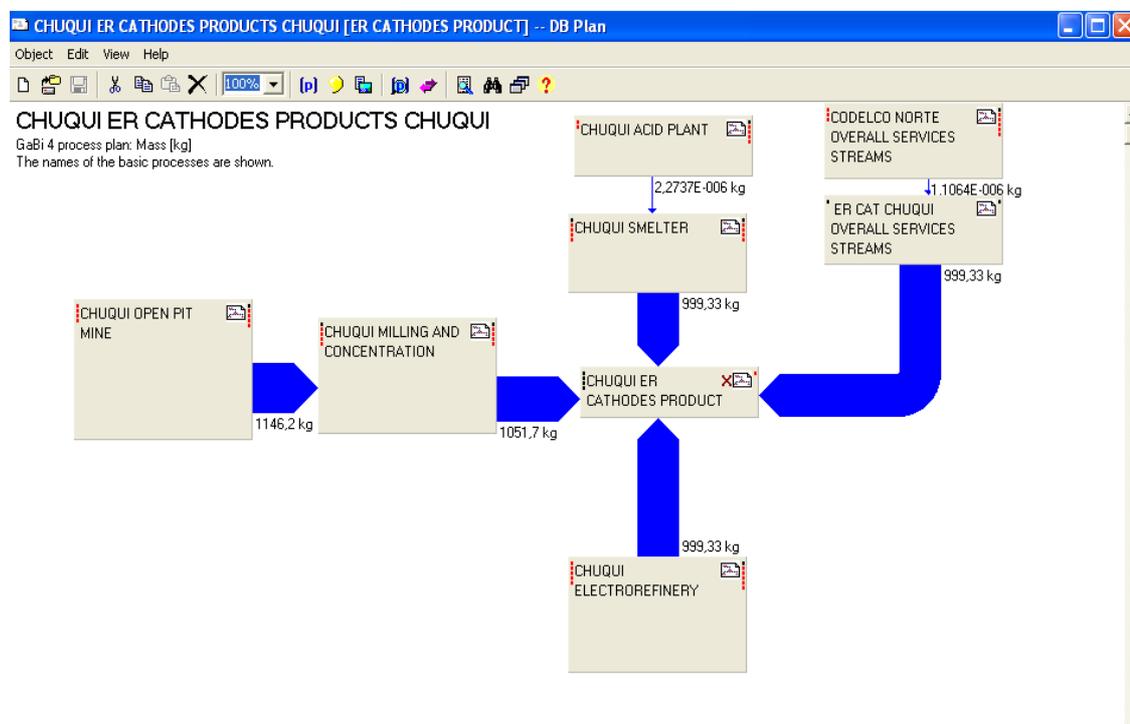


Figura 3-1: Modelo en GaBi de producción del Cátodo ER en Chuquicamata <sup>3</sup>

En la figura anterior se puede ver un ejemplo de un producto de Codelco modelado para GaBi, cuya producción está dada por la relación entre distintos procesos. Se trata de relaciones de flujo sencillas, donde se establece que outputs serán inputs entre éstos, y en qué relaciones.

En la siguiente figura se ve el ejemplo de un proceso en particular de Codelco. En éste se definen los inputs de materia y energía utilizados, además de los outputs que son resultado del proceso y que continuarán como variables al ser conectados a otros procesos.

<sup>3</sup> Fuente: Elaboración de Codelco utilizando GaBi

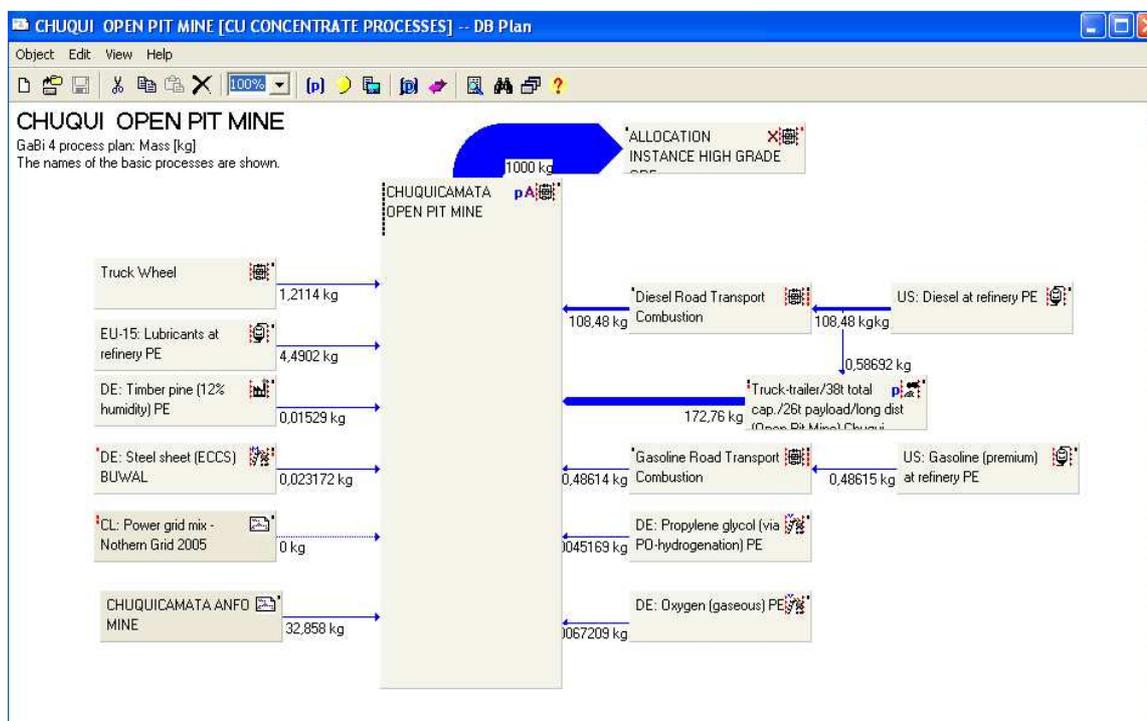


Figura 3-2: Modelo en GaBi del proceso de Extracción en Rajo Chuquicamata <sup>4</sup>

El programa GaBi arroja los resultados del indicador ambiental seleccionado desagregado por cada proceso que conforma la línea de producción del producto, así como a nivel total. A su vez, el programa muestra desagregado el indicador ambiental dentro de cada proceso señalando el valor asociado a cada input ingresado (sean estos energéticos o de materia).

A partir de los valores arrojados por GaBi para los indicadores huella de carbono y consumo de energía final, se realiza en esta Parte I de la Tesis el análisis de ambos y la relación existente entre ellos tanto en los productos como en los procesos.

<sup>4</sup> Fuente: Elaboración de Codelco utilizando GaBi

### Productos modelados y sus cantidades de producción ingresadas a GaBi

Son 11 los productos cuyos datos fueron entregados por Codelco para ser modelados en GaBi, los cuales corresponden al año 2005. En la siguiente tabla se presentan estos productos y los volúmenes de producción y venta de cada uno de ellos. El volumen de venta hace referencia a la cantidad del producto no utilizado como insumo para producir otro producto dentro de la Empresa. De esta manera se evita el doble conteo.

Tabla 3-1: Productos modelados en GaBi, cantidad producida y usos, en TFM Cu, año 2005 <sup>5</sup>

Producto	Producción	Usos	
		Venta	Insumo para otros productos
Concentrado de Cobre de Chuquicamata	556.783	139.530	378.296 para Cátodo ER de Chuquicamata, y 38.957 para Cátodo ER de Salvador
Concentrado de Cobre de Salvador	53.170	0	53.170 para Cátodo ER de Salvador
Concentrado de Cobre de Andina	248.175	222.745	25.431 para Cátodo ER de Salvador
Concentrado de Cobre de El Teniente	442.452	0	239.532 para RAF de El Teniente, y 202.919 para Cátodo ER de El Teniente/Ventanas
<b>TOTAL CONCENTRADO DE COBRE</b>		<b>362.274</b>	938.306
Cátodo ER de Chuquicamata	359.457	359.457	0
Cátodo ER de Salvador	112.526	112.526	0
Cátodo ER de El Teniente/Ventanas	196.717	196.717	0
<b>TOTAL CÁTODO ER</b>		<b>668.700</b>	
Cátodo EO de Chuquicamata	128.985	128.985	0
Cátodo EO de Radomiro Tomic	288.773	288.773	0
Cátodo EO de Salvador	26.816	26.816	0
<b>TOTAL CÁTODO EO</b>		<b>444.574</b>	
RAF de El Teniente	232.211	232.211	0
<b>TOTAL RAF</b>		<b>232.211</b>	
<b>TOTAL PRODUCTOS MODELADOS</b>		<b>1.707.760</b>	

<sup>5</sup> Fuente: Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco

Como se puede ver en la tabla anterior, son 4 los tipos de productos de cobre modelados. Se tienen 4 concentrados de cobre, 3 cátodo ER, 3 cátodo EO, y 1 RAF. Es necesario señalar que Codelco proporcionó los datos para ser modelados 10 productos, donde no se incluía al RAF de El Teniente. Este producto fue agregado a GaBi por parte del tesista, y se realizó quitando el proceso de Electro Refinería del modelo para el Cátodo ER de El Teniente/Ventanas.

Las cantidades señaladas en la tabla son las utilizadas en este trabajo para las ponderaciones según tipo de producto, y a nivel total de todos los productos producidos.

A continuación se presentan los **1.707.760** TMF Cu ingresados en el modelo para GaBi pero agrupados por divisiones según el origen del mineral.

Tabla 3-2: Producción de cobre por divisiones en la Empresa según el origen del mineral a partir de las cifras ingresadas en GaBi vs las cifras reales, en TMF Cu, año 2005

<b>DIVISIÓN</b>	<b>Producción ingresada a GaBi <sup>6</sup></b>	<b>Producción Real <sup>7</sup></b>
<b>Norte (Chuquicamata y RT)</b>	954.035	964.930
<b>Salvador</b>	77.710	77.520
<b>Andina</b>	247.087	248.137
<b>El Teniente</b>	428.928	437.393
<b>TOTAL</b>	<b>1.707.760</b>	<b>1.727.980</b>

Los 1.727.980 TMF Cu representan la producción real de la Empresa (se excluye su participación en la compañía El Abra) durante el 2005. Este valor es un 1,18% mayor que los 1.707.759,67 TMF Cu catastrados a partir de los datos proporcionados por

<sup>6</sup> Fuente: Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco

<sup>7</sup> Fuente: Anuario de estadísticas del cobre y otros minerales 1990-2009, COCHILCO

Codelco para GaBi para ese mismo año. Se observa que existe una diferencia del orden de 10.000 TMF Cu tanto en la División Norte como en la División de El Teniente. En el caso de El Teniente, parte de esa diferencia se justifica con la producción no modelada de cátodo EO dentro de dicha división (3.677 TMF Cu, a partir de datos proporcionados directamente por la Empresa). Para la otra parte de las diferencias no hay justificación disponible.

### **Procesos modelados**

Existen 7 procesos cuya unión entre sí determinan la producción de los 4 tipos de productos modelados en GaBi. Estos procesos son los que se nombran a continuación.

- **Extracción:** Se refiere a la extracción del estéril y mineral en la mina más el chancado del mineral. La mina puede ser tanto Mina Rajo como Mina Subterránea.
- **Concentración:** Toma el mineral sulfurado proveniente del chancado y lo lleva al proceso de molienda, para luego continuar con los procesos de flotación, espesamiento, filtrado y secado. El resultado es el concentrado de cobre.
- **Fundición:** Proceso que se inicia con la Fusión (llevado a cabo en un Convertidor Teniente u Horno Flash), donde se alimenta con el concentrado de cobre. Luego continúa con la Conversión (llevado a cabo en un Horno Pierce Smith), teniendo como resultado al Cobre Blister. El Cobre Blister se lleva al proceso de Refinado a Fuego, donde se obtiene como producto ánodo o RAF.
- **Planta de Ácido:** Se alimenta del dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) generado por la Fundición, y transforma este gas en ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>).

- **Electro Refinería:** Toma el ánodo proveniente del Refinado a Fuego, y lo transforma en cátodo ER.
- **Hidrometalurgia:** Toma el mineral oxidado proveniente del chancado y lo pasa sucesivamente por la lixiviación, extracción por solvente, y electro obtención, obteniendo así el cátodo EO.
- **Servicios:** Se trata de todas aquellas actividades que no pueden ser adjudicadas con claridad a ninguno de los 6 procesos nombrados. Se cuentan entre ellas los campamentos, administración, y el transporte de personal.

A continuación se señalan los procesos propios de los 4 tipos de producto modelados.

- **Concentrado de Cobre:** Extracción, Concentración, Servicios.
- **Cátodo ER:** Extracción, Concentración, Fundición, Planta de Ácido, Electro Refinería, Servicios.
- **Cátodo EO:** Extracción, Hidrometalurgia, Servicios.
- **RAF:** Extracción, Concentración, Fundición, Planta de Ácido, Servicios.

Los procesos se relacionan de la siguiente manera para generar alguno de los cuatro tipos de producto modelados.

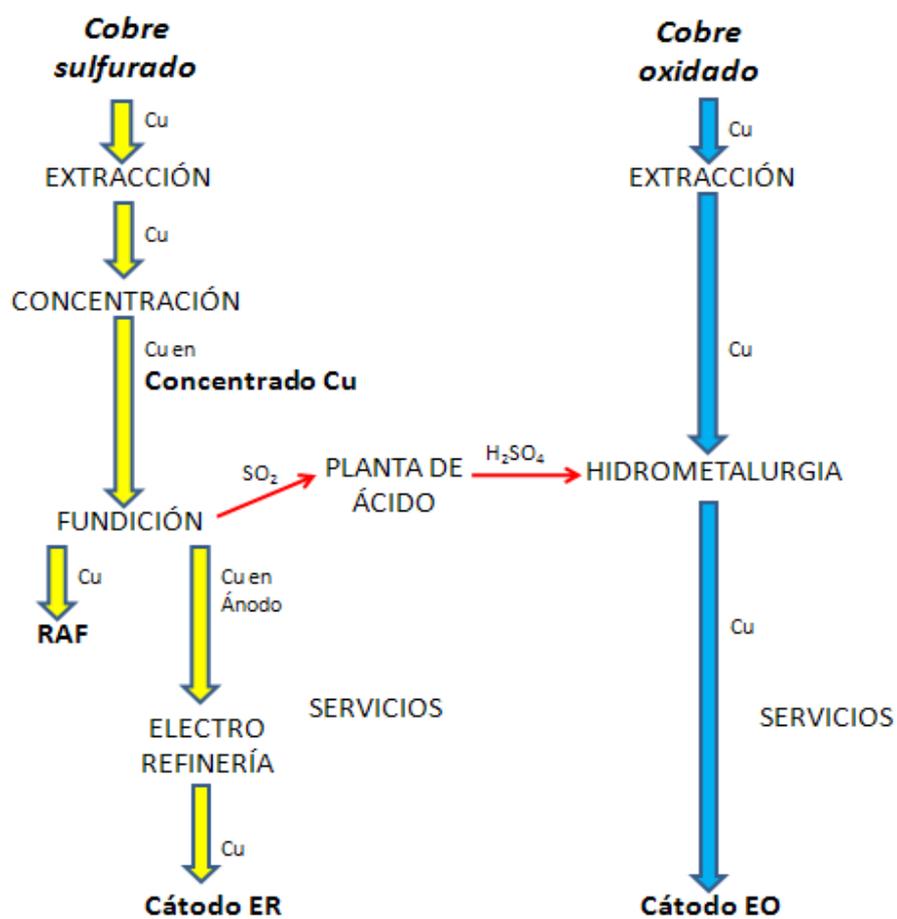


Figura 3-3: Relación entre procesos y productos <sup>8</sup>

<sup>8</sup> Fuente: Elaboración propia

La Planta de Ácido produce ácido sulfúrico donde una parte es utilizada como insumo para la lixiviación de la hidrometalurgia del cátodo EO dentro de la misma Empresa. Las emisiones de la Planta de Ácido se asignan diferenciando el ácido que es utilizado para la hidrometalurgia de aquel que es vendido a terceros. Las emisiones de la Planta de Ácido que son asignadas a los cátodos EO producidos con el ácido de dicha planta se definen por la siguiente fórmula:

$$E_{EO} = E_{PA} \times A_H / A_T$$

Donde

*E<sub>EO</sub>* = Emisiones de la Planta de Ácido que son asignadas a los cátodos EO alimentados con el ácido de dicha planta

*E<sub>PA</sub>* = Emisiones de la Planta de Ácido

*A<sub>H</sub>* = Cantidad de ácido utilizado para la Hidrometalurgia

*A<sub>T</sub>* = Cantidad de ácido total producido

Por otro lado, las emisiones restantes de la Planta de Ácido son asignadas a los productos que son propios de la fusión y electro refinación, entendiéndose que las Plantas de Ácido son una obligación a partir de la legislación que obliga a disminuir las emisiones de SO<sub>2</sub> de las fundiciones.

$$E_{ER} = E_{PA} \times (A_T - A_H) / A_T$$

Donde

*E<sub>ER</sub>* = Emisiones de la Planta de Ácido que son asignados a los RAF y cátodos ER que son producto de la fundición donde se encuentra la planta

*E<sub>PA</sub>* = Emisiones de la Planta de Ácido

*A<sub>H</sub>* = Cantidad de ácido utilizado para la Hidrometalurgia

*A<sub>T</sub>* = Cantidad de ácido total producido

En esta Tesis el ácido sulfúrico no es tratado como un co-producto en términos de asignación de emisiones, si no que como un resultado de las imposiciones ambientales. Bajo la perspectiva de co-producto, debería asignársele a este producto emisiones propias de todos los procesos anteriores a la fundición. Cualquiera de las dos visiones es aceptable, en la medida que se señale con claridad cuál se está utilizando.

### **Emisiones de la electricidad**

GaBi calculó para Chile a petición de Codelco las emisiones promedio de GEI según tipo de fuente de generación eléctrica. Los valores determinados incorporan las emisiones tanto directas como indirectas de generación, es decir, tanto las emisiones de la quema de los combustibles transformados, como las emisiones propias del funcionamiento de las plantas y de la fabricación de los combustibles utilizados. Los factores de emisión determinados son los siguientes:

Tabla 3-3: Factores de emisión promedio de fuentes eléctricas desarrollado por GaBi para Chile, en tCO<sub>2</sub>e/GWh producida<sup>9</sup>, año 2005

<b>FUENTE</b>	<b>FACTOR DE EMISIÓN</b>
Térmica a carbón	1.083
Térmica a diesel	1.117
Térmica a gas natural	585
Hidroelectricidad	23

Estos valores son los utilizados en GaBi para estimar las emisiones propias del consumo eléctrico de los productos de Codelco. El programa permite ajustar los porcentajes de cada tipo de fuente dentro de la matriz donde se encuentra la producción del producto.

---

<sup>9</sup> Fuente: Elaboración propia a partir del uso de GaBi

Como se ha señalado, los productos han sido modelados para lo que fue el año 2005. Los porcentajes según tipo de fuente, a partir de la información disponible en la CNE, fueron los siguientes:

Tabla 3-4: Participación porcentual según tipo de fuentes en el SING y SIC, y factores de emisión de las matrices en tCO<sub>2</sub>e/GWh producida, año 2005 <sup>10</sup>

<b>FUENTE/MATRIZ</b>	<b>SING</b>	<b>SIC</b>
<b>Térmica Carbón</b>	36%	13%
<b>Térmica Diesel</b>	0%	3%
<b>Térmica Gas Natural</b>	63%	17%
<b>Hidroelectricidad</b>	0%	67%
<b>Eólica</b>	0%	0%
<b>F.E. MATRIZ</b>	<b>762</b>	<b>287</b>

Los factores de emisión resultan ser el 2005 de 762 tCO<sub>2</sub>e/GWh producida en el SING, y 287 tCO<sub>2</sub>e/GWh producida en el SIC. Para la pérdida de transmisión, se utilizó en los modelos un 6,12%, que corresponde a la pérdida promedio a nivel nacional dentro de ese año (CNE, 2008). Aplicando esta pérdida, resulta un factor de emisión el 2005 de 812 tCO<sub>2</sub>e/GWh consumida en el SING, y de 306 tCO<sub>2</sub>e/GWh consumida en el SIC. Son estos dos últimos valores los que se aplican como factores de emisión por unidad de electricidad consumida dependiendo de la matriz donde se encuentre el producto modelado.

Se puede ver una importante participación del gas natural durante el 2005, situación que se revirtió en los años siguientes con los cortes de gas provenientes de Argentina y su sustitución por diesel, más la fuerte entrada de nuevas centrales térmicas a carbón.

---

<sup>10</sup> Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la CNE

A nivel teórico las emisiones propias del consumo eléctrico son de alcance II, y corresponden a las derivadas por la quema de combustibles fósiles utilizados para la generación de la electricidad consumida. Para ello se aplica la ecuación del siguiente tipo:

$$E_{k2} = \sum_1^2 FE_{ik} \times NA_{ik}$$

Donde

$FE_{ik}$  = Factor de emisión promedio anual del año  $k$  del sistema eléctrico  $i$ ,  $i = 1..2$

$NA_{ik}$  = Nivel de actividad de energía eléctrica consumida por el producto proveniente de la matriz eléctrica  $i$  del año  $k$ ,  $i = 1..2$

$E_{k2}$  = Emisiones totales del producto de alcance II durante el año  $k$

$i$  = Matriz eléctrica  $i$ , con  $i = 1..2$  (SING o SIC)

$k$  = Año  $k$

Eventualmente el producto puede tener distribuidas sus unidades en áreas de cobertura tanto SING como SIC. Es por ello que se aplica una sumatoria (de hecho ocurre con el Cátodo ER de Salvador, donde parte del concentrado de cobre proviene de Chuquicamata). El nivel de actividad del consumo eléctrico se expresa como unidades energéticas, y el factor de emisión como emisión de masa de CO<sub>2</sub>e por unidad de energía eléctrica consumida. Se debe señalar que al tratarse del factor de emisión por unidad de energía eléctrica consumida y no producida, ya viene incorporada la pérdida de transmisión.

### **Emisiones de los combustibles e insumos**

El programa GaBi cuenta con una enorme base de datos para combustibles e insumos no energéticos. La Industria del Cobre consume grandes cantidades de insumos no energéticos tales como el acero, la cal, y el nitrato de amonio. La fabricación y transporte de estos insumos tiene asociadas emisiones indirectas. Además, la Industria

del Cobre consume de manera importante combustibles dentro de las faenas, donde destaca el diesel. Dada la ausencia de información sobre los factores de emisión de los combustibles y de los insumos consumidos específicamente, es que se ha modelado utilizando los factores de emisión de combustibles e insumos que se encuentran dentro de la base de datos de GaBi y que son representativos de la media internacional.

Para las emisiones de alcance I, esto es los combustibles consumidos directamente dentro de las faenas, se aplica la siguiente ecuación:

$$E_{k1} = \sum_1^N FE_i \times NA_{ik}$$

Donde

$FE_i$  = Factor de emisión del combustible  $i$ , con  $i = 1..N$

$NA_{ik}$  = Nivel de actividad de combustible  $i$  dentro del año  $k$

$E_{k1}$  = Emisiones totales del producto de alcance I durante el año  $k$

$i$  = Combustible  $i$ , con  $i$  hasta los  $N$  tipos de combustibles consumidos

$k$  = Año  $k$

Los niveles de actividad están en términos de energía. Por otro lado, los factores de emisión de los combustibles están en términos de masa de CO<sub>2</sub> equivalente por unidad de energía de combustible consumida. Al ser CO<sub>2</sub> equivalente, incorpora todos los GEI con PCG definido (para el caso particular de la combustión, el CO<sub>2</sub>, el CH<sub>4</sub> y el N<sub>2</sub>O). Además el programa aplica el respectivo factor de oxidación, que es de un 99% para combustibles líquidos y 99,5% para combustibles gaseosos (IPCC, 1996).

Para las emisiones de alcance III, esto es los insumos producidos por terceros consumidos en las faenas, se aplica la siguiente ecuación:

$$E_{k3} = \sum_1^N FE_i \times NA_{ik}$$

Donde

$FE_i$  = Factor de emisión de la producción del insumo  $i$ , con  $i = 1..N$

$NA_{ik}$  = Nivel de actividad del insumo  $i$  dentro del año  $k$

$E_{k3}$  = Emisiones totales del producto de alcance I durante el año  $k$

$i$  = Insumo  $i$ , con  $i$  hasta los  $N$  tipos de insumos consumidos

$k$  = Año  $k$

### **Emisión total de un producto**

Corresponde a la suma de las emisiones de alcance I, alcance II y alcance III.

$$E_{Tk} = E_{k1} + E_{k2} + E_{k3}$$

Donde

$E_{Tk}$  = Emisión total del producto en el periodo  $k$

El programa GaBi presenta la emisión total de la producción de un producto, sin agrupar las emisiones en alcance I, II, o III. Por otro lado, entrega las emisiones desagregadas correspondientes a cada input de electricidad, combustible, e insumo. El trabajo inicial de esta Parte I de la Tesis consistió en agrupar manualmente las emisiones por grado de alcance dentro de cada proceso y a su vez dentro de cada producto. Se clasificaron y ordenaron más de 2.000 inputs, cuyos resultados y análisis se muestran en el capítulo a continuación, tanto de emisiones de GEI como de consumo de energía final (los consumos energéticos propios de los insumos son los correspondientes a su producción). En el Anexo A se muestran las emisiones de GEI en cada uno de los 11 productos agrupados por alcances, y estos a su vez desagregados por procesos. En el Anexo C se muestra lo mismo pero para los consumos de energía en los 11 productos.

#### 4. EMISIÓN PROMEDIO SEGÚN TIPO DE PRODUCTO DENTRO DE LA EMPRESA, AÑO 2005: ALCANCES Y COMPARACIONES

##### 4.1 Emisiones según tipo de producto

En la siguiente tabla se resume la emisión unitaria obtenida de los 11 productos modelados en GaBi. Se muestra la emisión unitaria en dos casos: incorporando la fabricación y transporte de los insumos consumidos, y excluyéndolos. Se muestran estos dos casos ya que interesa saber la contribución porcentual de la inclusión o no de los insumos. Más adelante se utiliza esta tabla para comparar estas emisiones unitarias con otras fuentes bibliográficas que no incorporan el alcance III dentro de sus cálculos.

Tabla 4-1: Resumen de emisiones unitarias por producto en la Empresa, con inclusión y exclusión de insumos, año 2005 <sup>11</sup>

	Producto	EXCLUSIÓN DE INSUMOS Combustibles y electricidad (kg CO <sub>2</sub> e/TMF Cu)	INCLUSIÓN DE INSUMOS Total (kg CO <sub>2</sub> e/TMF Cu)
SING	Concentrado Cobre Chuquicamata	2.076	2.548
	Cátodo ER Chuquicamata	3.606	4.214
	Cátodo EO Chuquicamata	3.657	3.736
	Cátodo EO Radomiro Tomic	3.796	3.897
SIC	Concentrado Cobre Salvador	2.066	2.516
	Cátodo ER Salvador <sup>12</sup>	2.727	3.260
	Cátodo EO Salvador	2.033	2.166
	Concentrado Cobre Andina	968	1.313
	Concentrado Cobre El Teniente	1.062	1.299
	Cátodo ER El Teniente/Ventanas	2.126	2.484
	RAF División El Teniente	1.905	2.255

<sup>11</sup> Fuente: Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco

<sup>12</sup> El Cátodo ER de Salvador tiene al Concentrado de Cobre de Chuquicamata (SING) como parte del concentrado de cobre utilizado para su producción.

### Concentrado de Cobre en la Empresa

Para el cálculo de la emisión promedio de 1 TMF de concentrado de cobre, se utiliza el volumen de producción total de cada uno (no de venta final) y las emisiones unitarias resumidas en la Tabla 4-1.

Tabla 4-2: Producción de concentrado de cobre en la Empresa, en TMF Cu, año 2005 <sup>13</sup>

Área	Producto	Producción total	Ley de Cu (%)
<b>SING</b>	<b>Concentrado de Cobre Chuquicamata</b>	556.783	30,35
<b>SIC</b>	<b>Concentrado de Cobre Salvador</b>	53.170	26,78
	<b>Concentrado de Cobre Andina</b>	248.175	29,79
	<b>Concentrado de Cobre El Teniente</b>	442.452	30,08
	<b>Total</b>	<b>1.300.580</b>	30,01 <sup>14</sup>

Los valores de emisión promedio resultantes se exponen a continuación.

Tabla 4-3: Emisión promedio de la producción de concentrado de cobre según área de matriz eléctrica en la Empresa, en kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu, año 2005 <sup>15</sup>

Área	Producción total por área (TMF Cu)	Combustibles y electricidad	Insumos	Total
<b>SING</b>	556.783	<b>2.076</b>	<b>472</b>	<b>2.548</b>
<b>SIC</b>	743.797	<b>1.102</b>	<b>289</b>	<b>1.391</b>
<b>TOTAL</b>	1.300.580	<b>1.519</b>	<b>367</b>	<b>1.886</b>

<sup>13</sup> Fuente: Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco

<sup>14</sup> Ley ponderada por volumen de producción total de cada Concentrado de Cobre

<sup>15</sup> Fuente: Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco

A nivel total, la inclusión de los insumos aumenta en un 24,2% las emisiones.

### **Cátodo ER en la Empresa**

Para el cálculo de la emisión promedio de 1 TMF Cu de cátodo ER se utiliza las emisiones unitarias resumidas en la Tabla 4-1 y sus respectivos volúmenes de producción. Los resultados se exponen en la tabla siguiente.

Tabla 4-4: Emisión promedio de la producción de cátodo ER según área de matriz eléctrica en la Empresa, en kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu, año 2005 <sup>16</sup>

<b>Área</b>	<b>Producción total por área (TMF Cu)</b>	<b>Combustibles y electricidad</b>	<b>Insumos</b>	<b>Total</b>
<b>SING</b>	359.457	<b>3.606</b>	<b>608</b>	<b>4.214</b>
<b>SIC <sup>17</sup></b>	309.243	<b>2.345</b>	<b>421</b>	<b>2.766</b>
<b>TOTAL</b>	668.700	<b>3.023</b>	<b>521</b>	<b>3.544</b>

A nivel total, la inclusión de los insumos aumenta en un 17,2% las emisiones.

### **Cátodo EO en la Empresa**

Al igual que para el cátodo ER, para el cálculo de la emisión promedio de 1 TMF Cu de cátodo EO se utiliza las emisiones unitarias resumidas en la Tabla 4-1 y sus respectivos volúmenes de producción. Los resultados se exponen en la tabla siguiente.

---

<sup>16</sup> Fuente: Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco.

<sup>17</sup> Los valores presentados para el SIC se encuentran influenciados por el Concentrado de Cobre de Chuquicamata (SING) que es utilizado como insumo para la producción de Cátodo ER de Salvador.

Tabla 4-5: Emisión promedio de la producción de cátodo EO según área de matriz eléctrica en la Empresa, en kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu, año 2005 <sup>18</sup>

Área	Producción total por área (TMF Cu)	Combustibles y electricidad	Insumos	Total
<b>SING</b>	417.758	<b>3.753</b>	<b>94</b>	<b>3.847</b>
<b>SIC</b>	26.816	<b>2.033</b>	<b>133</b>	<b>2.166</b>
<b>TOTAL</b>	444.574	<b>3.649</b>	<b>97</b>	<b>3.746</b>

A nivel total, la inclusión de los insumos aumenta en un 2,7% las emisiones.

### Cátodo en la Empresa

La emisión de 1 TMF Cu de cátodo corresponde al promedio ponderado de la producción de cátodo ER y cátodo EO dentro de la Empresa. Las emisiones unitarias utilizadas para cada cátodo son las que se encuentran en la Tabla 4-1. Los resultados se exponen en la tabla siguiente.

Tabla 4-6: Emisión promedio de la producción de cátodo según área de matriz eléctrica en la Empresa, en kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu, año 2005 <sup>19</sup>

Área	Producción total por área (TMF Cu)	Combustibles y electricidad	Insumos	Total
<b>SING</b>	777.215	<b>3.685</b>	<b>332</b>	<b>4.017</b>
<b>SIC<sup>20</sup></b>	336.059	<b>2.320</b>	<b>398</b>	<b>2.718</b>
<b>TOTAL</b>	1.113.274	<b>3.273</b>	<b>352</b>	<b>3.625</b>

<sup>18</sup> Fuente: Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco.

<sup>19</sup> Fuente: Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco

<sup>20</sup> Los valores presentados para el SIC se encuentran influenciados por el Concentrado de Cobre de Chuquicamata (SING) que es utilizado como insumo para la producción de Cátodo ER de Salvador.

A nivel total, la inclusión de los insumos aumenta en un 10,8% las emisiones.

### **RAF en la Empresa**

En la Empresa solamente El Teniente produce RAF, por lo que no es necesario hacer cálculos adicionales más que los que aparecen en la Tabla 4-1. Se incluye en la producción de RAF de El Teniente la producción de Cobre Blister de la misma división.

Tabla 4-7: Tabla Emisión promedio de la producción de RAF según área de matriz eléctrica en la Empresa, en kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu, año 2005 <sup>21</sup>

Área	Producción total por área (TMF Cu)	Combustibles y electricidad	Insumos	Total
<b>SING</b>	0	--	--	--
<b>SIC</b>	232.211	<b>1.905</b>	<b>350</b>	<b>2.255</b>
<b>TOTAL</b>	232.211	<b>1.905</b>	<b>350</b>	<b>2.255</b>

A nivel total, la inclusión de los insumos aumenta en un 18,4% las emisiones.

### **Cu en la Empresa**

Se puede también obtener la emisión de 1 TMF Cu en la Empresa, indistintamente del tipo de producto. Considerando las emisiones unitarias presentes en la Tabla 4-1 y los volúmenes respectivos de venta, se obtienen los resultados expuestos en la tabla de a continuación.

---

<sup>21</sup> Fuente: Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco

Tabla 4-8: Emisión promedio de 1 TMF Cu según área de matriz eléctrica en la Empresa, en kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu, año 2005 <sup>22</sup>

Área	Producción total por área (TMF Cu)	Combustibles y electricidad	Insumos	Total
<b>SING</b>	916.745	<b>3.440</b>	<b>353</b>	<b>3.793</b>
<b>SIC<sup>23</sup></b>	791.015	<b>1.817</b>	<b>370</b>	<b>2.187</b>
<b>TOTAL</b>	1.707.760	<b>2.689</b>	<b>360</b>	<b>3.049</b>

A nivel total, la inclusión de los insumos aumenta en un 13,4% las emisiones.

De la tabla anterior se puede desprender que los insumos agregan 353 kg CO<sub>2</sub>-eq/TMF Cu en el SING, 370 kg CO<sub>2</sub>-eq/TMF Cu en el SIC, y 360 kg CO<sub>2</sub>-eq/TMF Cu a nivel total, todos valores muy similares.

Algunas observaciones de los valores presentados con respecto a las emisiones promedio por tipo de producto:

- El aporte de emisiones por inclusión de los insumos es mayor en el **Cátodo ER** (521 kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu) que en el **Cátodo EO** (97 kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu).
- En el **SING**, **sin insumos**, el **Cátodo EO** tiene una emisión levemente mayor al **Cátodo ER**. **Al agregar los insumos**, el **Cátodo ER** pasa a tener una emisión mayor al **Cátodo EO**.
- En el **SIC**, **sin insumos**, el **Cátodo ER** tiene una emisión mayor al **Cátodo EO**. **Al agregar los insumos**, el **Cátodo ER** continúa con una emisión mayor al **Cátodo EO** aumentando la diferencia.

<sup>22</sup> Fuente: Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco

<sup>23</sup> Los valores presentados para el SIC se encuentran influenciados por el Concentrado de Cobre de Chuquicamata (SING) que es utilizado como insumo para la producción de Cátodo ER de Salvador.

## **4.2 Influencia de la matriz eléctrica en la huella de carbono de los productos**

La matriz eléctrica influye significativamente en las emisiones de GEI. A partir de los factores de emisión desarrollados por GaBi para Chile, una matriz compuesta 100% por térmicas a diesel tiene un factor de emisión 47 veces mayor a una matriz compuesta 100% por hidroelectricidad, como se pudo ver en la Tabla 3-3.

En esta Tesis se desarrolla, para cada uno de los 11 productos de Codelco del 2005, una expresión unitaria que cuantifica la huella de carbono dependiendo de la composición de la matriz eléctrica de donde se alimenta de electricidad el producto, de manera ver la sensibilidad con respecto a la matriz eléctrica en distintos escenarios. Estas expresiones se pueden ver en el Anexo D. En estas se mantiene constante las emisiones provenientes del consumo de combustibles y de insumos, y varían solamente las del consumo eléctrico en función de la matriz eléctrica.

A partir de las expresiones unitarias contenidas en el Anexo D, se determinó una expresión unitaria promedio ponderada para cada tipo de producto producido en Codelco el 2005. Luego se evaluó cada una de estas expresiones promedio con el escenario más carbonizado en la matriz eléctrica y con el escenario menos carbonizado. En la siguiente tabla se ve la influencia de la matriz eléctrica en la emisión total de un tipo de producto considerando estos escenarios extremos.

Tabla 4-9: Emisión total por tipo de producto en la Empresa con escenarios de matriz eléctrica de mayor GEI y de menor GEI, en kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu, año 2005 <sup>24</sup>

Producto	Combustible e insumos	Electricidad 100% Hidro (OPCIÓN MENOR GEI)	Total Opción 1 Menor GEI	Electricidad 100% Térmica Diesel (OPCIÓN MAYOR GEI)	Total Opción 2 Mayor GEI	Razón Opción 2 / Opción 1
Concentrado de cobre	697	61	<b>758</b>	3.038	<b>3.735</b>	<b>4,93</b>
Cátodo ER	1.396	106	<b>1.502</b>	5.267	<b>6.663</b>	<b>4,44</b>
Cátodo EO	868	102	<b>970</b>	5.046	<b>5.914</b>	<b>6,10</b>

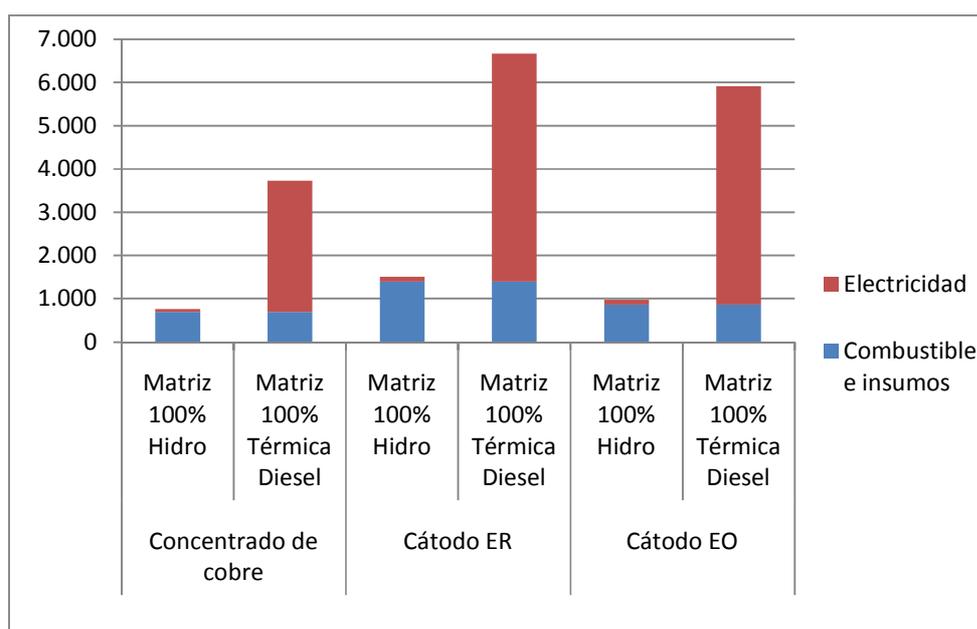


Figura 4-1: Emisión total por tipo de producto en la Empresa con escenarios de matriz eléctrica de mayor GEI y de menor GEI, en kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu, año 2005<sup>25</sup>

<sup>24</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco.

<sup>25</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco.

Es posible observar que el concentrado de cobre aumenta en 3,9 veces su emisión si se utiliza una matriz eléctrica 100% de térmica a diesel en lugar de una matriz 100% hidro. Para el caso del cátodo ER aumenta 3,4 veces, y para el caso del cátodo EO en 5,1 veces.

### **4.3 Participación porcentual de los alcances a nivel de Empresa**

Es posible hacer una estimación de las emisiones de la Empresa en su conjunto a partir de la huella de carbono de los 11 productos modelados en el programa GaBi. Sin embargo existen una serie de productos cupríferos adicionales y co-productos cuyos datos no fueron entregados por la Empresa utilizando GaBi. De todos modos, se debe tener presente que estos productos no modelados representan una fracción menor de la producción total de la Empresa.

Como se vio, el cálculo de la huella de carbono para los productos incluye las emisiones de alcance I, alcance II, y alcance III. Esto quiere decir que estimando la emisión total de la Empresa como la suma de la multiplicación de la emisión unitaria de cada producto por su volumen de venta final, se incorporan emisiones fuera de su control (alcance III), que representan las emisiones de la fabricación de los insumos utilizados y su traslado.

A continuación se presenta una tabla con las emisiones totales de cada uno de los 11 productos modelados considerando sus respectivos volúmenes de venta final, y la emisión total de la Empresa a partir de la suma de estos. Se utilizan los volúmenes de venta final y no su producción de manera de no hacer doble conteo (por ejemplo, el concentrado de cobre que es utilizado como insumo para producir cátodo ER o RAF)

Tabla 4-10: Emisiones totales por tipo de producto en la Empresa, año 2005 <sup>26</sup>

Producto	Emisión Unitaria kg CO <sub>2</sub> e/TMF Cu	Venta final TMF Cu	Emisión tCO <sub>2</sub> e
<b>Concentrado de Cobre Chuquicamata</b>	<b>2.548</b>	<b>139.530</b>	<b>355.495</b>
<b>Cátodo ER Chuquicamata</b>	<b>4.214</b>	<b>359.457</b>	<b>1.514.606</b>
<b>Cátodo EO Chuquicamata</b>	<b>3.736</b>	<b>128.985</b>	<b>481.826</b>
<b>Cátodo EO Radomiro Tomic</b>	<b>3.897</b>	<b>288.773</b>	<b>1.125.270</b>
<b>Concentrado de Cobre Salvador</b>	<b>2.516</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>Cátodo ER Salvador</b>	<b>3.260</b>	<b>112.526</b>	<b>366.823</b>
<b>Cátodo EO Salvador</b>	<b>2.166</b>	<b>26.816</b>	<b>58.087</b>
<b>Concentrado de Cobre Andina</b>	<b>1.313</b>	<b>222.745</b>	<b>292.515</b>
<b>Concentrado de Cobre El Teniente</b>	<b>1.299</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>Cátodo ER El Teniente/Ventanas</b>	<b>2.484</b>	<b>196.717</b>	<b>488.553</b>
<b>RAF El Teniente</b>	<b>2.255</b>	<b>232.211</b>	<b>523.736</b>
<b>TOTAL</b>		<b>1.707.760</b>	<b>5.206.909</b>

Como se ha visto las emisiones de los productos de la Empresa se pueden desagregar en emisiones propias del consumo de electricidad, de la fabricación de los insumos utilizados, y del uso de combustible dentro de las faenas.

En la siguiente tabla, se resume las emisiones agrupadas por grado de alcance para cada producto. Considerando el volumen de venta final de cada producto, es posible hacer una estimación de las emisiones totales de la Empresa según tipo de fuente.

---

<sup>26</sup> Fuente: Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco

Tabla 4-11: Emisiones de los productos de la Empresa agrupadas por tipo de fuente, en kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu, año 2005 <sup>27</sup>

	Producto	Electricidad	Combustibles	Insumos	Total
<b>SING</b>	<b>Concentrado Chuquicamata</b>	<b>1.529</b>	<b>546</b>	<b>472</b>	<b>2.548</b>
	<b>Cátodo ER Chuquicamata</b>	<b>2.629</b>	<b>977</b>	<b>607</b>	<b>4.214</b>
	<b>Cátodo EO Chuquicamata</b>	<b>3.031</b>	<b>625</b>	<b>79</b>	<b>3.736</b>
	<b>Cátodo EO Radomiro Tomic</b>	<b>2.935</b>	<b>861</b>	<b>101</b>	<b>3.897</b>
<b>SIC</b>	<b>Concentrado Salvador</b>	<b>1.656</b>	<b>410</b>	<b>450</b>	<b>2.516</b>
	<b>Cátodo ER Salvador</b>	<b>1.739</b>	<b>987</b>	<b>533</b>	<b>3.260</b>
	<b>Cátodo EO Salvador</b>	<b>1.298</b>	<b>735</b>	<b>134</b>	<b>2.166</b>
	<b>Concentrado Andina</b>	<b>744</b>	<b>224</b>	<b>345</b>	<b>1.313</b>
	<b>Concentrado El Teniente</b>	<b>955</b>	<b>106</b>	<b>237</b>	<b>1.299</b>
	<b>Cátodo ER ET/Ventanas</b>	<b>1.503</b>	<b>623</b>	<b>357</b>	<b>2.484</b>
	<b>RAF El Teniente</b>	<b>1.376</b>	<b>530</b>	<b>350</b>	<b>2.255</b>

<sup>27</sup> Fuente: Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco

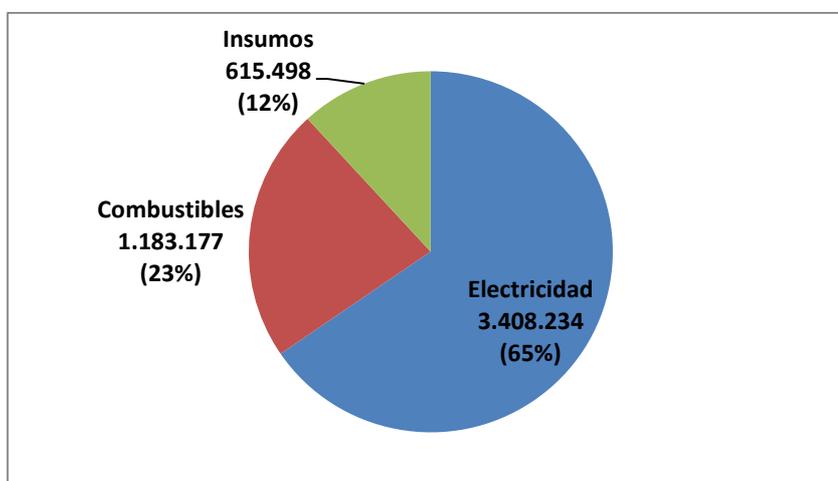


Figura 4-2: Emisiones de la Empresa agrupadas por tipo de fuente, en tCO<sub>2</sub>e, año 2005<sup>28</sup>

Las emisiones propias del uso de combustibles dentro de las faenas son 1.183.177 tCO<sub>2</sub>e, representando el 22,72% del total de la Empresa. Este valor incluye las emisiones propias de la fabricación de los combustibles utilizados. Las emisiones de la quema de combustibles dentro de la organización corresponden a alcance I, mientras que las de la fabricación de los combustibles a alcance III.

Las emisiones propias de la generación de electricidad son 3.408.234 tCO<sub>2</sub>e y representan el 65,46% del total. Se incluye en este cálculo las emisiones propias de la fabricación de los combustibles utilizados dentro de los centros de transformación. Las emisiones propias de la quema de combustibles en los centros de transformación corresponden a alcance II, mientras que las de la fabricación de los combustibles utilizados a alcance III. Cabe recordar que en los modelos de todos los productos en GaBi se ha utilizado una pérdida de transmisión del 6,12%, correspondientes a la media nacional del año 2005 (Comisión Nacional de Energía, 2010).

<sup>28</sup> Fuente: Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco

Las emisiones propias de la fabricación de los insumos utilizados son 615.498 tCO<sub>2</sub>e y representan el 11,82% del total. En este valor se ha incluido las emisiones propias del traslado de los insumos fabricados desde sus centros de producción hasta las distintas faenas de la Empresa. Todas las emisiones señaladas son de alcance III.

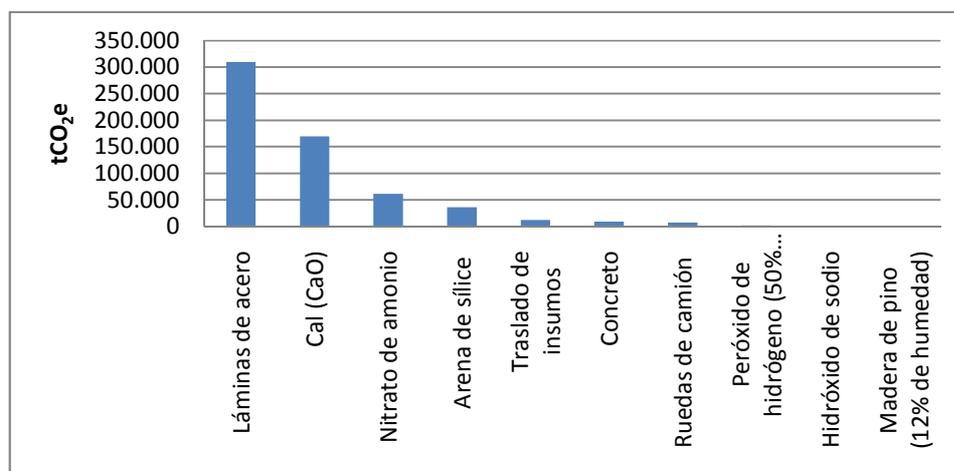
Si excluimos a la fabricación de insumos, tenemos un total de 4.591.411 tCO<sub>2</sub>e emitidos por la Empresa durante el 2005. En este total, las emisiones propias del consumo eléctrico representan un 74,23%, y las del uso de combustibles dentro de las faenas un 25,77%. Si se consideran las emisiones propias de la fabricación de insumos y su traslado, las emisión total aumenta en un 13,41%.

#### **4.4 Contribución de los insumos según tipo en las emisiones de GEI de alcance III en la Empresa**

La fabricación de los insumos utilizados, así como su traslado, tienen asociadas emisiones de GEI que constituyen las emisiones de alcance III. En el caso de la Empresa, existen ciertos insumos que son los principales responsables de estas emisiones. En la siguiente tabla se pueden ver los principales insumos responsables de las emisiones de alcance III.

Tabla 4-12: Principales insumos emisores de GEI a nivel total de la Empresa, año 2005<sup>29</sup>

	INSUMO	Emisión tCO <sub>2</sub> e	Porcentaje	Porcentaje acumulado
1	Acero	309.639	50,31%	50,31%
2	Cal (CaO)	169.171	27,49%	77,79%
3	Nitrato de amonio	60.936	9,90%	87,69%
4	Arena de sílice	36.225	5,89%	93,58%
5	Traslado de insumos (Diesel)	12.125	1,97%	95,55%
6	Concreto	8.937	1,45%	97,00%
7	Neumáticos de camión	7.015	1,14%	98,14%
8	Peróxido de hidrógeno (50% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> )	1.890	0,31%	98,45%
9	Hidróxido de sodio	1.703	0,28%	98,72%
10	Madera de pino (12% de humedad)	1.535	0,25%	98,97%

Figura 4-3: Principales insumos emisores de GEI a nivel total de la Empresa, año 2005<sup>30</sup>

Como se puede ver en la tabla anterior, existen cinco insumos que son responsables del 95% de las emisiones de alcance III de toda la Empresa. Estos son, en orden decreciente de importancia, el acero, la cal, el nitrato de amonio, la arena de sílice, y el diesel

<sup>29</sup> Fuente: Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco

<sup>30</sup> Fuente: Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco

utilizado para el transporte de los insumos. Dentro de estos insumos, sobresale el acero con el 50,31% de la contribución total, seguido de la cal con el 27,49%.

Al realizar este análisis según tipo de producto, la importancia relativa de los insumos cambia, ya que los insumos utilizados en cada caso son distintos. En la siguiente tabla se pueden ver los principales insumos emisores en la producción del concentrado de cobre.

Tabla 4-13: Principales insumos emisores de GEI en el concentrado de cobre en la Empresa, año 2005 <sup>31</sup>

	<b>INSUMO</b>	<b>Emisión kgCO<sub>2</sub>e /TMF Cu <sup>32</sup></b>	<b>Porcentaje</b>	<b>Porcentaje acumulado</b>
1	Acero	225,33	61,38%	61,38%
2	Cal (CaO)	96,23	26,21%	87,59%
3	Nitrato de amonio	26,75	7,28%	94,87%
4	Concreto	6,06	1,65%	96,52%
5	Traslado de insumos (Diesel)	5,15	1,40%	97,92%
6	Neumáticos de camión	2,49	0,68%	98,60%
7	Peróxido de hidrógeno (50% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> )	1,45	0,40%	99,00%
8	Madera de pino (12% de humedad)	1,00	0,27%	99,27%
9	Cloruro de sodio (NaCl)	0,64	0,18%	99,45%
10	Propileno glicol (vía hidratación del óxido de propileno)	0,29	0,08%	99,52%
	<b>SUMA TOTAL INSUMOS</b>	<b>367,14</b>		

El acero es la materia prima de las bolas propias de la molienda. Por otro lado la cal es un neutralizador de pH utilizado durante la flotación del mineral. El nitrato de amonio es materia prima del ANFO utilizado en las tronaduras. El concreto y el diesel utilizado para el traslado de insumos siguen en importancia dentro de la lista.

<sup>31</sup> Fuente: Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco

<sup>32</sup> Valores promedio ponderados a partir de las emisiones en los cuatro concentrados de cobre producidos en Codelco el 2005. Para la ponderación se utiliza los volúmenes de producción de concentrado de cobre y no los volúmenes de venta.

En la siguiente tabla se pueden ver los principales insumos emisores para el cátodo ER dentro de la Empresa.

Tabla 4-14: Principales insumos emisores de GEI en el cátodo ER en la Empresa, año 2005 <sup>33</sup>

	<b>INSUMO</b>	<b>Emisión kgCO<sub>2</sub>e/TMF Cu<sup>34</sup></b>	<b>Porcentaje</b>	<b>Porcentaje acumulado</b>
1	Acero	278,71	53,47%	53,47%
2	Cal (CaO)	138,37	26,55%	80,02%
3	Arena de sílice	49,30	9,46%	89,47%
4	Nitrato de amonio	28,47	5,46%	94,94%
5	Traslado de insumos (Diesel)	9,60	1,84%	96,78%
6	Concreto	6,74	1,29%	98,07%
7	Neumáticos de camión	2,95	0,57%	98,64%
8	Hidróxido de sodio	2,33	0,45%	99,09%
9	Madera de pino (12% de humedad)	1,24	0,24%	99,32%
10	Oxígeno gaseoso	1,01	0,19%	99,52%
	<b>SUMA TOTAL INSUMOS</b>	<b>521,24</b>		

Si se compara con los principales insumos emisores de la producción del concentrado de cobre, se ven que en este caso son bastante parecidos, sabiendo que el concentrado de cobre es insumo para el cátodo ER. La diferencia la marca la arena de sílice, la cual es utilizada en el proceso de Fundición para la captación del hierro contenido en los minerales sulfurados fundidos.

Para el caso del RAF, los principales insumos emisores son muy similares a los del cátodo ER. El cátodo ER posee como proceso adicional la electro refinera, la cual, en términos relativos, consume pocos insumos. No debe sorprender que el RAF arroje emisiones de alcance III menores a las obtenidas para el concentrado de cobre, ya que se

<sup>33</sup> Fuente: Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco

<sup>34</sup> Valores promedio ponderados a partir de las emisiones en los tres cátodos ER producidos en Codelco el 2005. Para la ponderación se utiliza los volúmenes de venta de cada cátodo ER.

utilizaron cuatro concentrados de cobre distintos para la ponderación (con la consiguiente diversidad en características de la roca, operaciones, etc).

Tabla 4-15: Principales insumos emisores de GEI en el RAF en la Empresa, año 2005 <sup>35</sup>

	<b>INSUMO</b>	<b>Emisión kgCO<sub>2</sub>e/TMF Cu <sup>36</sup></b>	<b>Porcentaje</b>	<b>Porcentaje acumulado</b>
1	Acero	236,62	67,62%	67,62%
2	Cal (CaO)	49,30	14,09%	81,71%
3	Concreto	16,62	4,75%	86,46%
4	Arena de sílice	14,04	4,01%	90,47%
5	Nitrato de amonio	13,40	3,83%	94,29%
6	Traslado de insumos (Diesel)	11,62	3,32%	97,62%
7	Oxígeno gaseoso	3,41	0,98%	98,59%
8	Madera de pino (12% de humedad)	2,45	0,70%	99,29%
9	Neumáticos de camión	1,30	0,37%	99,66%
10	Hidróxido de sodio	0,34	0,10%	99,76%
	<b>SUMA TOTAL INSUMOS</b>	<b>349,94</b>		

Por último, para el caso del cátodo EO, las emisiones totales de alcance III son bastante menores si se compara con el concentrado de cobre y el cátodo ER. Estas emisiones vienen sobre todo del uso del nitrato de amonio para las tronaduras, y de la cal utilizada como regulador de la acidez durante la lixiviación

<sup>35</sup> Fuente: Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco

<sup>36</sup> Valores del único RAF producido en la Empresa el 2005.

Tabla 4-16: Principales insumos emisores de GEI en el cátodo EO en la Empresa, año 2005 <sup>37</sup>

	INSUMO	Emisión kgCO <sub>2</sub> e/TMF Cu <sup>38</sup>	Porcentaje	Porcentaje acumulado
1	Nitrato de amonio	57,33	59,43%	59,43%
2	Cal (CaO)	24,04	24,92%	84,35%
3	Neumáticos de camión	8,32	8,63%	92,98%
4	Traslado de insumos (Diesel)	3,10	3,21%	96,19%
5	Acero	0,44	0,46%	96,65%
6	Hidróxido de sodio	0,15	0,15%	96,80%
7	Madera de pino (12% de humedad)	0,08	0,09%	96,89%
8	Etilenglicol (vía oxidación de metano)	0,08	0,09%	96,97%
9	Carbonato de sodio (Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )	0,01	0,01%	96,99%
10	Propileno glicol (vía hidratación del óxido de propileno)	0,01	0,01%	97,00%
	SUMA TOTAL INSUMOS	<b>96,46</b>		

En Anexos (A.12) se puede ver la contribución por tipo de insumo en las emisiones de alcance III de la producción unitaria de cada uno de los 11 productos modelados en GaBi.

A continuación se hace una breve descripción de los principales insumos emisores en la Empresa. Se enumeran de manera decreciente, según su contribución en las emisiones totales de alcance III de la Empresa el 2005.

- **ACERO** (50,31% de las emisiones de alcance III)

Factor de emisión en GaBi: 3,26 kgCO<sub>2</sub>e/kg de acero

<sup>37</sup> Fuente: Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco

<sup>38</sup> Valores promedio ponderados a partir de las emisiones en los tres cátodos EO producidos en la Empresa el 2005. Para la ponderación se utiliza los volúmenes de venta de cada cátodo EO.

Su uso principal es para la fabricación de las bolas utilizadas durante el proceso de molienda, proceso donde el mineral es molido tanto en molinos de bolas tradicionales como en los molinos SAG. En los molinos de bolas se utilizan bolas de 3,5 pulgadas de diámetro. El 80% del mineral es reducido a un máximo de 180 micrones en un proceso de aproximadamente 20 minutos. En la molienda SAG se utilizan bolas de 5 pulgadas de diámetro, logrando también que la mayor parte del mineral quede bajo los 180 micrones de diámetro (Codelcoeduca, 2010).

La fabricación del acero se hace dentro de la industria siderúrgica, la cual es intensiva en consumo de energía. Las mayores emisiones son propias de la fabricación del arrabio (principal compuesto del acero), el cual es producido en los altos hornos. Se requiere de un alto consumo de energía para lograr el material fundido, el cual es una mezcla entre hierro, coque, y caliza. Además, existen emisiones de CO<sub>2</sub> derivadas de reacciones propias de la fusión de todos estos elementos dentro de los altos hornos.



Figura 4-4: Bolas de acero utilizadas en la molienda

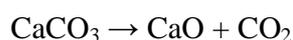
- **CAL** (27,49% de las emisiones de alcance III)

Factor de emisión en GaBi: 1,22 kgCO<sub>2</sub>e/kg de cal

La cal es utilizada como regulador de pH en distintos procesos dentro de la Empresa. Destaca su uso en el proceso de flotación del mineral, así como en el

tratamiento de las aguas residuales de la Planta de Ácido. También se utiliza para la lixiviación del material oxidado.

La cal proviene de la calcinación del carbonato de calcio, a través de la siguiente reacción.



La calcinación produce  $\text{CO}_2$  como uno de sus productos. Por otro lado requiere de energía externa suficiente para lograr la temperatura propicia para esta reacción. Estos factores en su conjunto son los principales determinantes de la huella de carbono propia de la cal.



Figura 4-5: Saco con cal

- **NITRATO DE AMONIO** (9,90% de las emisiones de alcance III)

Factor de emisión en GaBi: 0,34  $\text{kgCO}_2\text{e/kg}$  de nitrato de amonio

El nitrato de amonio es el principal compuesto para la fabricación del ANFO, el cual es el explosivo utilizado para las tronaduras. El ANFO tiene además como compuesto a un derivado del petróleo. En el caso de la Empresa se utiliza diesel como combustible para la mezcla. La fórmula química del nitrato de amonio es  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ .

La huella del carbono del nitrato de amonio proviene de los combustibles necesarios para generar las condiciones de reacción entre el H y N para fabricar el amoniaco, y luego para la reacción entre amoniaco y ácido nítrico para fabricar el nitrato de amonio.



Figura 4-6: Saco con ANFO

- **ARENA DE SÍLICE** (5,89% de las emisiones de alcance III)

Factor de emisión en GaBi: 0,04 kgCO<sub>2</sub>e/kg de arena de sílice

El principal uso de la arena de sílice es en la etapa de fusión dentro del proceso de Fundición. En esta etapa (donde no se utilizan combustibles externos para generar el calor sino que éste es generado por las propiedades exotérmicas de las reacciones propias que ocurren) la arena de sílice tiene por función captar el hierro contenido en los minerales sulfurados de manera que este mineral sea sacado de circulación.

La huella de carbono de la arena de sílice está dada por el uso de combustibles y explosivos necesarios para su extracción y procesamiento.



Figura 4-7: Arena de sílice

- **COMBUSTIBLE PARA EL TRASLADO DE LOS INSUMOS** (1,97% de las emisiones de alcance III)

Factor de emisión en GaBi: 0,01 kgCO<sub>2</sub>e/kg de carga (distancia total recorrida en promedio)

Parte de la huella de carbono del uso de los insumos viene del transporte de éstos desde los centros de producción y venta hasta los centros de consumo que en este caso son las diversas divisiones de la Empresa. El IM2 de Codelco realizó una estimación gruesa del consumo de combustible para el transporte de los insumos. Para ello, asumió para el cálculo camiones de 38 toneladas de capacidad para carga general, y de 26 toneladas para carga de explosivos. El combustible utilizado por estos camiones es el diesel, por lo que la huella de carbono viene del uso de este combustible, así como de su producción.



Figura 4-8: Camión

- **CONCRETO** (1,45% de las emisiones de alcance III)

Factor de emisión en GaBi: 0,10 kgCO<sub>2</sub>e/kg de concreto

El concreto u hormigón es una mezcla de cemento y arena que puede tener distintas proporciones. Dentro de la Empresa su mayor uso es para obras dentro de las minas subterráneas.

La huella de carbono del concreto viene dada sobre todo por el cemento. En particular el clinker (resultado de la calcinación de caliza y arcilla) como insumo para la fabricación del cemento, es el que tiene la mayor huella de carbono. El clinker, al igual que la cal, proviene de un proceso de calcinación. La calcinación produce CO<sub>2</sub>, al igual que los combustibles utilizados para generar el calor necesario para dicha reacción.



Figura 4-9: Saco con cemento

- **NEUMÁTICOS DE CAMIÓN MINERO** (1,14% de las emisiones de alcance III)

Factor de emisión en GaBi: 2,29 kgCO<sub>2</sub>e/kg de neumático de camión minero

Su uso es principalmente para los camiones de rajo abierto. La huella de carbono de los neumáticos es propia de la energía e insumos utilizados para su producción.



Figura 4-10: Rueda de camión minero

- **PERÓXIDO DE HIDRÓGENO ( $H_2O_2$ )** (0,31% de las emisiones de alcance III)

Factor de emisión en GaBi: 2,63 kgCO<sub>2</sub>e/kg de peróxido de hidrógeno

El peróxido de hidrógeno, más conocido como agua oxigenada, se utiliza como reactivo dentro del proceso de flotación en la División Andina. La huella de carbono de su producción está dada principalmente por el consumo de energía para generar la electrólisis de la solución de ácido sulfúrico, solución a partir de la cual se produce este compuesto.



Figura 4-11: Agua oxigenada

- **HIDRÓXIDO DE SODIO** (0,28% de las emisiones de alcance III)

Factor de emisión en GaBi: 1,42 kgCO<sub>2</sub>e/kg de hidróxido de sodio

El 2005 se utilizó en la Electro Refinería de Ventanas. También fue utilizado en las plantas de ácido como un agente neutralizador. La huella de carbono está dada por la energía externa necesaria para la generación del NaOH, compuesto que se produce a partir de la siguiente reacción electrolítica.

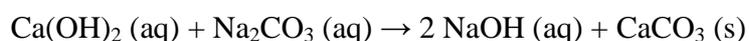


Figura 4-12: Soda cáustica

- **MADERA DE PINO** (0,25% de las emisiones de alcance III)

Factor de emisión en GaBi: 0,52 kgCO<sub>2</sub>e/kg de madera de pino

Destaca el uso de la madera dentro de las minas subterráneas. También es utilizado en la piro refinación para la extracción del oxígeno del cobre blíster, obteniendo así ánodos y RAF como productos. La huella de carbono de la madera está asociada a todas las actividades de la silvicultura para su producción, así como su aserrado.



Figura 4-13: Tablas de madera de pino

- **CLORURO DE SODIO (NaCl)**

Factor de emisión en GaBi: 0,10 kgCO<sub>2</sub>e/kg de cloruro de sodio

La sal se utiliza como depresor y dispersor de minerales silíceos que no se desean en la flotación de División Andina. Su huella de carbono está asociada principalmente a su extracción.

- **PROPILENO GLICOL**

Factor de emisión en GaBi: 8,46 kgCO<sub>2</sub>e/kg de propileno glicol

Este compuesto se utiliza durante el proceso de Extracción como anticongelante, tanto de minas rajo como subterráneas. El propileno es un derivado del petróleo. El propileno glicol procede de la hidratación del óxido de propileno. La huella de carbono está dada por toda su cadena productiva.

- **OXÍGENO GASEOSO**

Factor de emisión en GaBi: 0,18 kgCO<sub>2</sub>e/kg de oxígeno gaseoso

Su uso es principalmente durante la fusión en la Fundición y en la flotación del mineral. El oxígeno como producto requiere de energía para separar el oxígeno

del aire a través de la generación de presión. La huella de carbono está dada principalmente por la energía necesaria para llevar a cabo su producción.

- **ETILENO GLICOL**

Factor de emisión en GaBi: 2,67 kgCO<sub>2</sub>e/kg de etileno glicol

Se utiliza como anticongelante durante el proceso de Extracción, tanto de minas rajo como subterráneas. Se utiliza como anticongelante. Las emisiones de su producción son las propias del proceso de oxidación del metano, desde donde se obtiene este producto.

- **CARBONATO DE SODIO (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)**

Factor de emisión en GaBi: 2,03 kgCO<sub>2</sub>e/kg de carbonato de sodio

El Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> se utiliza como solución con agua durante la lixiviación en Hidrometalurgia de División Salvador. La huella de carbono está asociada a su proceso de preparación a partir de sal, caliza y amoníaco, el cual incluye calcinación en su última fase.

#### 4.5 Comparación de las participaciones de los grados de alcance con otras fuentes bibliográficas

Existe una sola empresa minera de cobre en Chile que hasta la fecha de esta Tesis ha reportado sus emisiones incorporando los tres alcances. Se trata de Collahuasi<sup>39</sup>, donde el 2009 sus emisiones se repartieron en los siguientes porcentajes: 20% de alcance I, 69% de alcance II, y 11% de alcance III. Como se puede ver, estos porcentajes son muy similares a los obtenidos en el capítulo 4.3 para Codelco.

Dado que Collahuasi produce sobre todo concentrado de cobre (producto donde sobresale el consumo eléctrico por sobre el de combustibles) y lo produce solamente en el SING, no llama la atención la mayor participación porcentual del alcance II en esa empresa.

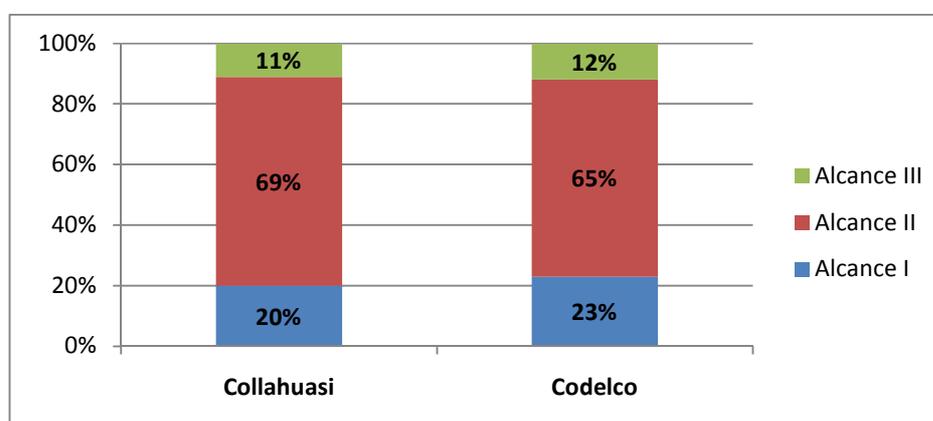


Figura 4-14: Participaciones porcentuales de los alcances incluyendo alcance III <sup>40</sup>

<sup>39</sup> “Medición de la Huella de Carbono en Collahuasi, 2009” desarrollado por Collahuasi con la asesoría de PriceWaterhouseCoopers.

<sup>40</sup> Fuente: Elaboración propia a partir de datos contenidos en “Medición de la Huella de Carbono en Collahuasi, 2009” para Collahuasi, y datos de Codelco utilizando GaBi para el 2005.

Según el Anuario de estadísticas del cobre y otros minerales 1990-2009 de COCHILCO, el 2005 en la Industria del Cobre en Chile se emitieron 3,06 millones de tCO<sub>2</sub>e por consumo de combustibles fósiles en las faenas (más la fabricación de los combustibles), y 8,09 millones de tCO<sub>2</sub>e por consumo de energía eléctrica, totalizando ese año una emisión de 11,15 millones de tCO<sub>2</sub>e.

Lo anterior resulta en que las emisiones por consumo de combustibles correspondieron a un 27,44%, y las por consumo de electricidad a un 72,56% del total. Este total no incorpora las emisiones propias de la fabricación de los insumos utilizados. Estos valores son muy similares a los obtenidos en el capítulo 4.3 de esta Tesis, donde, como se vio, las emisiones de la Empresa el 2005 por consumo de combustible fueron el 25,77% del total de sus emisiones, y las de electricidad correspondieron al 74,23%, si se excluye del total las emisiones de la fabricación y transporte de insumos.

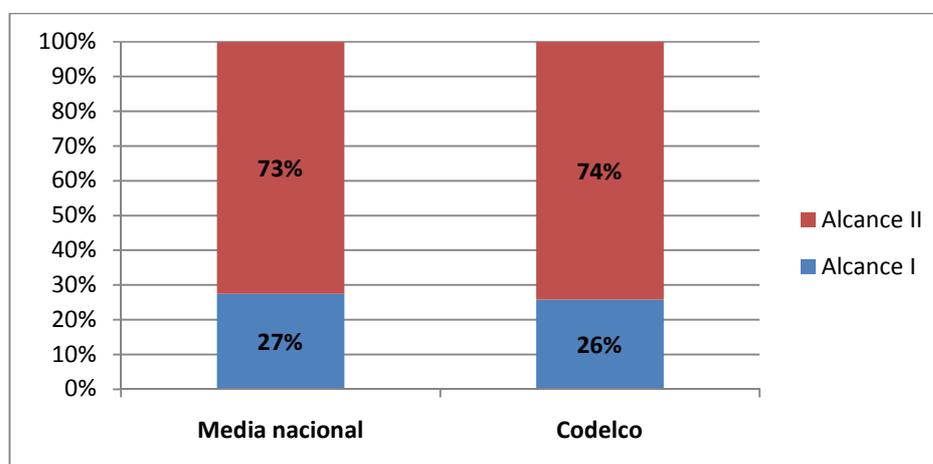


Figura 4-15: Participaciones porcentuales de los alcances excluyendo alcance III, año 2005 <sup>41</sup>

<sup>41</sup> Fuente: COCHILCO para la media nacional, y datos de Codelco utilizando GaBi.

#### 4.6 Diferencias entre los factores de emisión de GaBi con los de COCHILCO

Es interesante evaluar qué tan bien se comportan las huellas de carbono de los productos de Codelco obtenidas utilizando GaBi como valores para estimar la emisión total de la Industria del Cobre en Chile durante el año evaluado (2005).

A través de la consulta N° 1.441 por medio de la web de COCHILCO y respondida el día 4 de agosto de 2010, se obtuvo la información de producción de cobre a nivel nacional desagregada por matriz eléctrica de alimentación y por tipo de producto para el 2005. La información recibida fue la siguiente:

Tabla 4-17: Producción nacional de cobre desagregada por matrices eléctricas y tipos de producto, año 2005, en TMF Cu <sup>42</sup>

PRODUCTO	SING	SIC
<b>Concentrado de Cobre</b>	1.238.488	939.312
<b>Cátodo ER</b>	576.436	500.572
<b>Cátodo EO</b>	1.403.655	180.965
<b>Cobre Blister</b>	273.074	45.626
<b>RAF</b>		162.400
<b>Total por área de matriz</b>	3.491.652	1.828.876
<b>Total País</b>	5.320.528	

Considerando las cantidades de producción de la Tabla 4-17 y evaluando por las emisiones unitarias según tipo de producto y matriz eléctrica del capítulo 4.1 <sup>43</sup>, se puede calcular cuánto se obtendría como emisión total de la industria a nivel nacional.

<sup>42</sup> Fuente: Elaboración propia a partir de la consulta N° 1.441 realizada vía web a COCHILCO y respondida por Sara Pimentel.

<sup>43</sup> Se evalúa utilizando las emisiones unitarias sin considerar los insumos, de manera de hacer el valor comparable al calculado por COCHILCO.

Tabla 4-18: Evaluación de las emisiones unitarias de los productos de Codelco para estimar la emisión total de la Industria del Cobre en Chile el 2005 <sup>44</sup>

	PRODUCTO	Producción Nacional TMF Cu	Emisión del producto utilizando GaBi con datos de Codelco <sup>45</sup> (kg CO <sub>2</sub> e/TMF Cu)	Emisión total tCO <sub>2</sub> e
SING	Concentrado de Cobre	1.238.488	2.076	2.570.841
	Cátodo ER	576.436	3.606	2.078.888
	Cátodo EO	1.403.655	3.753	5.267.735
	RAF <sup>46</sup>	273.074	3.323 <sup>47</sup>	907.398
	<b>Total área SING</b>	<b>3.491.653</b>		<b>10.824.861</b>
SIC	Concentrado de Cobre	939.312	1.102	1.035.197
	Cátodo ER	500.572	2.345	1.173.651
	Cátodo EO	180.965	2.033	367.824
	RAF <sup>48</sup>	208.026	1.905	396.391
	<b>Total área SIC</b>	<b>1.828.876</b>		<b>2.973.064</b>
	<b>Total nacional</b>	<b>5.320.528</b>		<b>13.797.925</b>

Los 13.797.925 tCO<sub>2</sub>e resultantes son un 23,75% mayor que los 11.150.000 tCO<sub>2</sub>e estimados por COCHILCO para el 2005.

Cabe preguntarse qué tan mayores en la realidad son las huellas de carbono de los productos de Codelco utilizando GaBi en relación a los de la media de la Industria del Cobre del país según COCHILCO. En primer lugar, pueden existir diferencias tecnológicas, operacionales, y de características media de la roca de la Empresa en

<sup>44</sup> Fuente: Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco, y datos de COCHILCO para la producción nacional.

<sup>45</sup> Se utiliza las emisiones unitarias obtenidas sin considerar los insumos, de manera de hacer el valor comparable al calculado por COCHILCO el cual no considera a estos en el cálculo.

<sup>46</sup> Incluye la producción de Cobre Blister.

<sup>47</sup> La Empresa no produce RAF en el SING. Para estimar una emisión unitaria propia de la Empresa en la zona, se ha restado las emisiones propias de la Electro Refinería en el Cátodo ER de Chuquicamata.

<sup>48</sup> Incluye la producción de Cobre Blister.

relación a la media de la Gran Industria del Cobre en el país, tema el cual no es abordado ni analizado dentro de esta Tesis.

Sin embargo, es importante ver las diferencias de las metodologías aplicadas, ya que ahí se incorporan factores que modifican los valores y que son independientes a las características operacionales y mineras mencionadas.

En ambos casos, tanto en la metodología utilizando GaBi como en la de COCHILCO, las emisiones (de Codelco y del Total Nacional de la Industria del Cobre respectivamente) vienen dadas por la sumatoria de los niveles de actividad de energía multiplicados por sus respectivos factores de emisión.

$$E_k = \sum_1^N FE_{ik} \times NA_{ik} + \sum_1^2 FE_{jk} \times NA_{jk}$$

Donde

$FE_{ik}$  = Factor de emisión del combustible  $i$ , con  $i = 1..N$  el año  $k$

$NA_{ik}$  = Nivel de actividad de combustible  $i$  dentro de la organización el año  $k$

$FE_{jk}$  = Factor de emisión de la matriz eléctrica  $j$ , con  $j = 1..2$  el año  $k$

$NA_{jk}$  = Nivel de actividad de la matriz eléctrica  $j$  dentro de la organización el año  $k$

$E_k$  = Emisiones totales de la organización durante el año  $k$

$i$  = Combustible  $i$ , con  $i$  hasta los  $N$  tipos de combustibles consumidos

$j$  = Matriz eléctrica  $j$ , con  $j = 1,2$  (SING y SIC)

$k$  = Año  $k$

La razón de mayor peso que explica las diferencias en las huellas de carbono está en los factores de emisión de las matrices eléctricas utilizados. En el caso de GaBi estos factores incluyen todo el Análisis de Ciclo de Vida de los combustibles utilizados para la generación de electricidad, mientras que COCHILCO se reduce al factor de emisión propio de la quema del combustible para generar una unidad de energía.

COCHILCO utiliza para los combustibles los factores de emisión de CO<sub>2</sub> del IPCC 1996 (junto a sus respectivos factores de oxidación) para cuantificar el factor de emisión de una matriz eléctrica. Incorpora también en su cálculo las emisiones de CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O en términos de CO<sub>2</sub>e, donde también utiliza los factores de emisión del IPCC 1996. Estos factores de emisión son aplicados a las cantidades de combustible utilizados en una matriz eléctrica determinada durante un año (diesel, petróleo combustible, coke de petróleo, carbón bituminoso, y gas natural) para generar electricidad. Una vez teniendo la emisión total de GEI por la generación de electricidad en la matriz eléctrica, se divide este valor por la cantidad de electricidad generada, obteniendo así el factor de emisión de la matriz.

Para el caso de GaBi, los factores de emisión utilizados fueron elaborados por GaBi para Chile a petición de Codelco, utilizando el concepto de Análisis de Ciclo de Vida. Como se vio en el capítulo 3, GaBi agrupa las fuentes de generación eléctrica en 4 grandes tipos: térmica a carbón, térmica a diesel, térmica a gas natural, e hidroelectricidad. Bajo el concepto de Análisis de Ciclo de Vida, la hidroelectricidad también posee un factor de emisión, que corresponde a los combustibles necesarios (directos e indirectos) para el funcionamiento de este tipo de fuente. Se desconoce por parte de GaBi el detalle de la información y supuestos utilizados para la confección de estos factores.

En la siguiente tabla se pueden ver los factores de emisión de las matrices eléctricas para la última década utilizados por COCHILCO y por GaBi.

Tabla 4-19: Factores de emisión de las matrices SING y SIC, según tipo de fuente, en tCO<sub>2</sub>e/GWh producida <sup>49</sup>

Matriz	Fuente / Año	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
SIC	GaBi	262	243	279	338	287	274	499	479	441
	COCHILCO	205	183	198	248	212	202	344	325	284
SING	GaBi	732	766	723	771	762	837	972	1.029	986
	COCHILCO	637	696	610	696	673	786	915	953	912

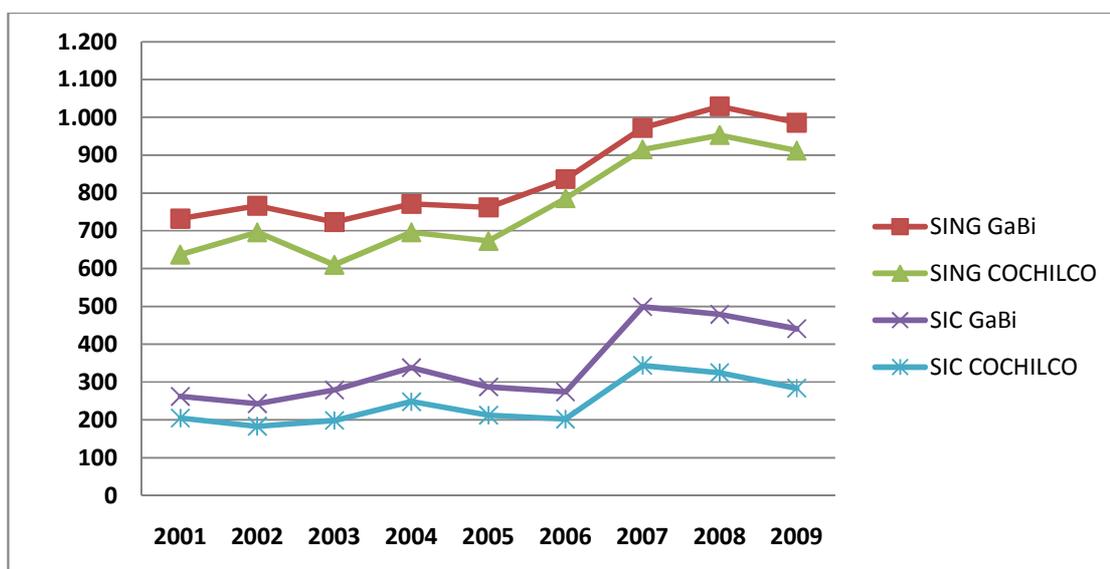


Figura 4-16: Factores de emisión de las matrices SING y SIC, según tipo de fuente, en tCO<sub>2</sub>e/GWh producida <sup>50</sup>

<sup>49</sup> Fuente: Elaboración propia utilizando los factores de emisión de GaBi y los factores de emisión entregados por Sara Pimentel para el caso de COCHILCO.

<sup>50</sup> Fuente: Elaboración propia utilizando los factores de emisión de GaBi y los factores de emisión entregados por Sara Pimentel para el caso de COCHILCO.

Se puede observar que los factores de emisión de COCHILCO son menores a los de GaBi. Destaca la gran diferencia relativa para el caso del SIC. Por un lado se explica por la presencia de un factor de emisión propio para la hidroelectricidad en GaBi. Por otro, que COCHILCO no incorpora los desechos forestales y el licor negro como fuentes emisoras (biomasa, la cual es carbono neutral bajo las indicaciones del IPCC 1996), mientras que en la metodología de GaBi se ha agrupado la biomasa junto al carbón y petcoke dentro de “Térmica a carbón”.

Con respecto a la quema de combustibles por alcance I, COCHILCO incorpora dentro de sus cálculos un porcentaje correspondiente a la producción de los combustibles, equivalente al 1% de todas las emisiones de la Industria del Cobre en Chile. GaBi también incorpora factores de emisión propios de toda la huella de carbono de la producción de los combustibles utilizados. En el caso de COCHILCO, la estimación se hace a partir de la quema de los combustibles utilizados para el funcionamiento de la Industria del Petróleo y Gas, señalados en el Sector Energía de los balances energéticos de la Comisión Nacional de Energía.

Por último, también se debe considerar el haber agrupado al cobre blister y RAF como RAF en la metodología de este trabajo, siendo que el cobre blister tiene una emisión total menor, y su producción a nivel nacional fue casi el doble en cantidad en relación al RAF el 2005. De todos modos esto es de poco peso relativo.

## **5. COMPARACIÓN DE PROCESOS POR SUS EMISIONES DE GEI**

De modo de tener una visión crítica de los valores obtenidos en cuanto a emisiones de GEI de los distintos procesos modelados en GaBi, es que se procederá a compararlos con valores presentados en otras fuentes bibliográficas.

### **5.1 Emisión promedio de GEI de los procesos en la Empresa**

En primer lugar, es necesario realizar el cálculo de la emisión de GEI promedio en cada uno de los procesos modelados en GaBi. Como se ha visto, estos son 7 y son la Extracción, Concentración, Hidrometalurgia, Fundición, Planta de Ácido, Electro Refinería, y Servicios.

Para hacer comparables los procesos modelados con los procesos definidos en otras fuentes bibliográficas, es que se separa a Extracción en Mina Rajo y Mina Subterránea según sea el caso, y se agrupa a Fundición y Planta de Ácido como Fundición.

Los valores resultantes de los procesos de Codelco utilizando GaBi tienen la particularidad de incorporar las emisiones propias de los insumos utilizados. Las referencias bibliográficas presentadas no incorporan a los insumos; solamente incorporan a la electricidad y los combustibles consumidos.

El detalle de los datos utilizados (emisión unitaria de los productos y porcentajes de recuperación) para determinar la emisión de GEI promedio de cada proceso, se encuentra en el Anexo B.

A continuación se presenta una tabla que resume las emisiones de GEI por tipo de proceso en la Empresa durante el año 2005, utilizando GaBi.

Tabla 5-1: Valores promedios ponderados de las emisiones de GEI de los procesos de la Empresa utilizando GaBi, año 2005 <sup>51</sup>

PROCESO	Emisión <sup>52</sup>	Unidad
Mina Rajo	725	kg CO <sub>2</sub> e/TMF Cu en el producto
	610	kg CO <sub>2</sub> e/TMF Cu en el mineral
Mina Subterránea	221	kg CO <sub>2</sub> e/TMF Cu en el concentrado
	196	kg CO <sub>2</sub> e/TMF Cu en el mineral
Concentración	840	kg CO <sub>2</sub> e/TMF Cu en el concentrado
Hidrometalurgia	2.194	kg CO <sub>2</sub> e/TMF Cu en el cátodo EO
Fundición y Planta de Ácido	798	kg CO <sub>2</sub> e/TMF Cu en el ánodo
Electro Refinería	254	kg CO <sub>2</sub> e/TMF Cu en el cátodo ER
Servicios	394	kg CO <sub>2</sub> e/TMF Cu en el producto

## 5.2 Comparación con otras fuentes bibliográficas

De todas las fuentes encontradas para comparar las emisiones de GEI de los procesos, la que tiene un sentido práctico de comparación es la que entrega COCHILCO para el año 2005, ya que se trata del mismo año y se compara con el mismo país (por ende las mismas matrices eléctricas). De manera de hacer comparables las emisiones estimadas para Codelco utilizando GaBi con las estimadas por COCHILCO, se excluye de los valores de Codelco las emisiones de alcance III (COCHILCO no las estima).

<sup>51</sup> Fuente: Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco.

<sup>52</sup> Excluye la emisión de los insumos, de manera de hacer el valor comparable a las fuentes bibliográficas.

Tabla 5-2: Comparación de las emisiones de GEI promedio de los procesos entre Codelco y la media nacional, año 2005 <sup>53</sup>

PROCESO	Codelco utilizando GaBi	Media Chile según COCHILCO	Unidad
Mina Rajo	610	420	kg CO <sub>2</sub> e/TMF Cu en el mineral
Mina Subterránea	196	200	kg CO <sub>2</sub> e/TMF Cu en el mineral
Concentración	840	920	kg CO <sub>2</sub> e/TMF Cu en el concentrado
Hidrometalurgia	2.194	1.920	kg CO <sub>2</sub> e/TMF Cu en el cátodo EO
Fundición y Planta de Ácido	798	810	kg CO <sub>2</sub> e/TMF Cu en el ánodo
Electro Refinería	254	250	kg CO <sub>2</sub> e/TMF Cu en el cátodo ER
Servicios	394	100	kg CO <sub>2</sub> e/TMF Cu en el producto

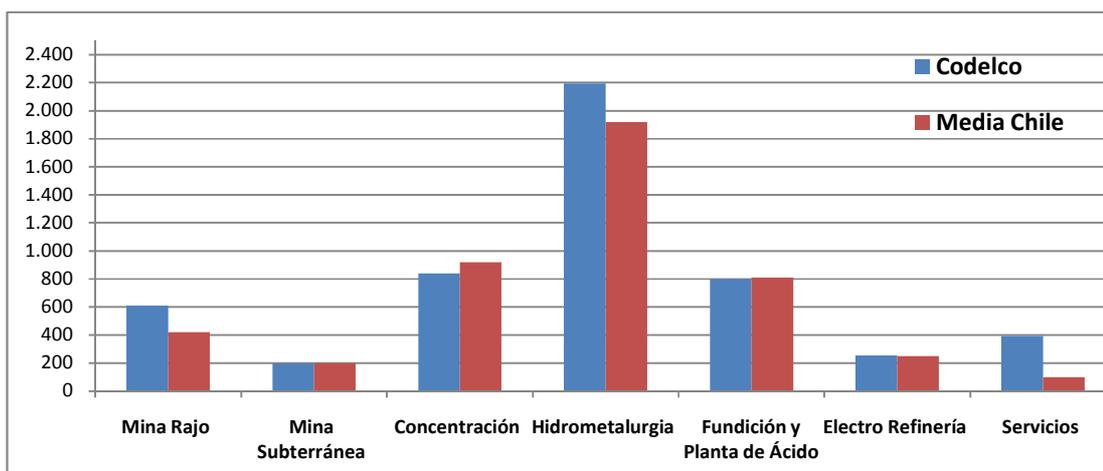


Figura 5-1: Comparación de las emisiones promedio de los procesos entre Codelco y la media nacional, año 2005 <sup>54</sup>

<sup>53</sup> Fuente: Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco, y Anuario de estadísticas del cobre y otros minerales 1990-2009, COCHILCO, para la media de Chile.

<sup>54</sup> Valores de Mina Rajo y Mina Subterránea en kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu en el mineral, Concentración en kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu en el concentrado, Hidrometalurgia en kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu en el cátodo EO, Fundición y Planta de Ácido en kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu en el ánodo, Electro Refinería en kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu en el cátodo ER, y Servicios en kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu en el producto. Los valores de Codelco corresponden a los promedios de los procesos dentro de la Empresa.

Se observa que los valores de Codelco utilizando GaBi son mayores a los entregados por COCHILCO en Mina Rajo, Hidrometalurgia, Electro Refinería, y Servicios, donde destacan las diferencias en Mina Rajo y Servicios. En el resto de los procesos son mayores los valores de COCHILCO.

Los valores presentados tienen implícito distintas proporciones en cuanto a participación de las dos matrices (SING y SIC) en los procesos. Por otro lado, como se vio en el capítulo 4.6, para una misma matriz eléctrica COCHILCO utiliza factores de emisión menores a los de Codelco utilizando GaBi. De manera de quitar el peso propio del factor de emisión de las matrices eléctricas (el cual influye significativamente en los resultados de emisión), en el capítulo 7 se hace una comparación de los procesos en términos de su consumo energético unitario. Antes de eso, en el capítulo 6, se muestra un cuadro resumen con los consumos energéticos de los 11 productos de Codelco, desagregados en consumo energético de combustibles, electricidad, y la fabricación de los insumos utilizados.

A continuación se presenta una tabla donde se compara el valor promedio ponderado obtenido de cada proceso dentro de la Empresa para el 2005 con otras fuentes además de COCHILCO. Los valores presentados para Codelco corresponden a los calculados en esta Tesis sin incluir las emisiones propias de la fabricación de los insumos utilizados (alcance III), de manera de hacerlos comparables con las otras fuentes que se presentan.

Tabla 5-3: Comparación de emisiones de GEI de los procesos de Codelco utilizando GaBi con otras fuentes bibliográficas <sup>55</sup>

PROCESO	UNIDAD	FUENTE				
		NOMBRE	Codelco utilizando GaBi	W. Kuckshinrichs <sup>56</sup>	W. Kuckshinrichs <sup>57</sup>	COCHILCO <sup>58</sup>
		PAÍS	Chile	Promedio mundial	Promedio mundial	Chile
		AÑO	2005	2009	2015	2005
<b>Mina Rajo</b>	(kg CO <sub>2</sub> e/TMF Cu en el producto)		725	731	560	
<b>Mina Rajo</b>	(kg CO <sub>2</sub> e/TMF Cu en el mineral)		610			420
<b>Mina Subterránea</b>	(kg CO <sub>2</sub> e/TMF Cu en el mineral)		221			200
<b>Concentración</b>	(kg CO <sub>2</sub> e/TMF Cu en el concentrado)		894			920
<b>Hidrometalurgia</b>	(kg CO <sub>2</sub> e/TMF Cu en el cátodo EO)		2.194	2.157	1.480	1.920
<b>Fundición y Planta de Ácido</b>	(kg CO <sub>2</sub> e/TMF Cu en el ánodo)		798	1.421	810	810
<b>Electro Refinería</b>	(kg CO <sub>2</sub> e/TMF Cu en el cátodo ER)		254	307	230	250
<b>Servicios</b>	(kg CO <sub>2</sub> e/TMF Cu en el producto)		394			100

Si bien en esta tabla se comparan fuentes bibliográficas correspondientes a distintos países con distintos años, los valores para un mismo proceso se encuentran dentro de cierto rango, que, dada la gran cantidad de variables e incertidumbre incorporada en los cálculos, no deben llamar la atención.

<sup>55</sup> Elaboración propia a partir de las distintas fuentes.

<sup>56</sup> Fuente: W. Kuckshinrichs et al. I Applied Energy 84 (2007) 842-852

<sup>57</sup> Fuente: W. Kuckshinrichs et al. I Applied Energy 84 (2007) 842-852

<sup>58</sup> Fuente: Anuario de estadísticas del cobre y otros minerales 1990-2009, COCHILCO

## **6. CONSUMO ENERGÉTICO PROMEDIO SEGÚN TIPO DE PRODUCTO DENTRO DE LA EMPRESA, AÑO 2005**

En los capítulos anteriores se ha analizado las emisiones de GEI de los productos y procesos dentro de Codelco. En este capítulo se presentan los consumos energéticos para la producción de los 11 productos de la Empresa durante el 2005 utilizando GaBi. Los consumos energéticos están en términos de consumo de energía final.

En la siguiente tabla se resume el consumo energético de cada producto. Los consumos energéticos se muestran agrupados a su vez en aquellos propios del consumo de electricidad, en aquellos propios del consumo de combustibles, y en aquellos propios del consumo de insumos distintos a la electricidad y combustibles (se refiere a la energía necesaria para fabricar dichos insumos). Esta agrupación es parte del trabajo en esta Tesis, donde se dispuso inicialmente de todos los consumos energéticos desagregados para cada combustible e insumos (más de 2.000 inputs) pero sin estar agrupados por tipo de alcance.

Tabla 6-1: Consumo energético unitario de los productos de Codelco, en MJ/TMF Cu, año 2005 <sup>59</sup>

Producto	Electricidad	Combustibles	TOTAL SIN INSUMOS	Insumos	TOTAL CON INSUMOS
Concentrado de Cobre Chuqui	6.786	8.139	14.925	3.777	18.701
Concentrado de Cobre Salvador	19.479	5.626	25.105	3.920	29.025
Concentrado de Cobre Andina	8.751	3.238	11.989	2.690	14.678
Concentrado de Cobre Teniente	11.240	1.639	12.879	2.116	14.994
<b>Promedio Concentrado de Cobre</b>	<b>9.195</b>	<b>4.890</b>	<b>14.085</b>	<b>3.010</b>	<b>17.094</b>
Cátodo ER Chuqui	14.712	16.933	31.645	5.372	37.017
Cátodo ER Salvador	16.811	13.203	30.014	4.305	34.319
Cátodo ER Teniente/Ventanas	17.683	8.950	26.633	3.108	29.740
<b>Promedio Cátodo ER</b>	<b>15.939</b>	<b>13.957</b>	<b>29.896</b>	<b>4.526</b>	<b>34.422</b>
Cátodo EO Chuqui	13.450	9.867	23.317	752	24.070
Cátodo EO RT	13.021	12.790	25.811	1.019	26.830
Cátodo EO Salvador	15.271	10.093	25.364	1.830	27.195
<b>Promedio Cátodo EO</b>	<b>13.281</b>	<b>11.779</b>	<b>25.060</b>	<b>990</b>	<b>26.051</b>
RAF Teniente	16.185	7.592	23.777	3.012	26.788
<b>Promedio RAF</b>	<b>16.185</b>	<b>7.592</b>	<b>23.777</b>	<b>3.012</b>	<b>26.788</b>
<b>Promedio Codelco</b>	<b>13.850</b>	<b>10.601</b>	<b>24.451</b>	<b>3.078</b>	<b>27.530</b>

A partir de la tabla anterior se puede observar que el cátodo ER es el producto de mayor demanda energética en la Empresa. En este producto, y excluyendo a los insumos, el

<sup>59</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco.

consumo energético por electricidad representó el 53% y el consumo energético por combustibles el 47%. El cátodo EO resultó ser menor en cuanto a consumo de energía total. Sin embargo, las proporciones de los consumos energéticos por electricidad y combustibles fueron las mismas al cátodo ER (excluyendo el aporte de los insumos).

Para el caso del concentrado de cobre, se tiene que su consumo energético unitario es el menor como tipo de producto. En este producto, las proporciones de los consumos eléctricos y de combustible le otorgan mayor importancia a la electricidad al compararlos con los cátodos, con un consumo energético por electricidad del 65% del total, y con un 35% por combustibles.

## **7. COMPARACIÓN DE PROCESOS POR SU CONSUMO ENERGÉTICO**

No tiene mucho sentido hacer una comparación de la huella de carbono de un determinado tipo de producto de la Industria del Cobre producido en lugares con distintas matrices eléctricas. Se trata de una industria de consumo masivo de electricidad, por lo que la huella de carbono de sus productos está dada fundamentalmente por la composición de la matriz eléctrica desde donde se alimenta. De modo de aislar el efecto de las matrices, y ver solamente el efecto propio de las diferencias de las tecnologías, políticas operacionales, y características de la roca extraída (ley, dureza, relación esteril/mineral), es que resulta interesante hacer comparaciones por el consumo de energía final por unidad de producto producido. Es aquí donde se pueden encontrar oportunidades a nivel operacional de manera de reducir la demanda energética unitaria, y por ende, de las emisiones de GEI. Por hoy la Industria del Cobre, al casi no tener participación dentro de la producción de la energía eléctrica que consume, no tiene poder de control de los factores de emisión de las matrices desde donde se alimenta.

En este capítulo se compara el consumo energético de cada proceso a nivel promedio dentro de la Empresa con los consumos energéticos reportados a nivel nacional por COCHILCO. Para ello, en primer lugar es necesario determinar el consumo energético promedio ponderado de cada proceso, sabiendo que un determinado proceso está presente en distintas divisiones.

Se debe tener presente que todos los consumos energéticos con los que se trabaja en esta Tesis se refieren a los consumos energéticos finales y no primarios. El consumo energético primario se refiere a la energía inicial necesaria para generar la energía final que es consumida.

## 7.1 Consumo energético de los procesos en las distintas divisiones

Para el cálculo del consumo energético promedio ponderado no se ha incluido el consumo energético propio de la fabricación de los insumos utilizados en los productos. Por definición los insumos son fabricados por terceros, y utilizan energía que está fuera del control de la Industria del Cobre. Por esta razón esta energía no es considerada en los consumos energéticos por parte de COCHILCO ni por parte de ninguna empresa minera. De manera de ser consistente con las comparaciones, tampoco ha sido considerada en los cálculos de esta Tesis.

A continuación se muestran los consumos energéticos unitarios de cada tipo de proceso en las distintas divisiones donde están presentes dentro de la Empresa, utilizando GaBi.

### 7.1.1 Extracción en Mina Rajo

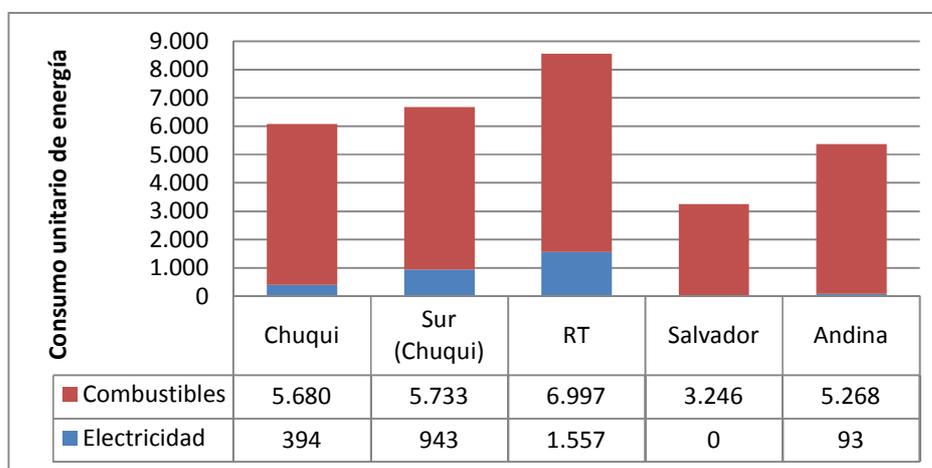


Figura 7-1: Comparación del consumo unitario de energía del proceso de Mina Rajo en MJ/TMF Cu en el mineral, año 2005 <sup>60</sup>

<sup>60</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco

Las diferencias en las cantidades de consumo de combustible están dadas por los tamaños de los rajos, así como de la relación estéril/mineral, y la ley de la roca. A mayor tamaño de los rajos, más deben recorrer los camiones. Por otro lado, a mayor relación estéril/mineral, y a menor ley de la roca, más roca debe ser extraída para obtener una unidad de cobre en el mineral chancado.

En cuanto a los consumos eléctricos, en los rajos de Salvador y Andina no hay uso de correas transportadoras, sino que la roca es depositada directamente por gravedad.

### 7.1.2 Extracción en Mina Subterránea

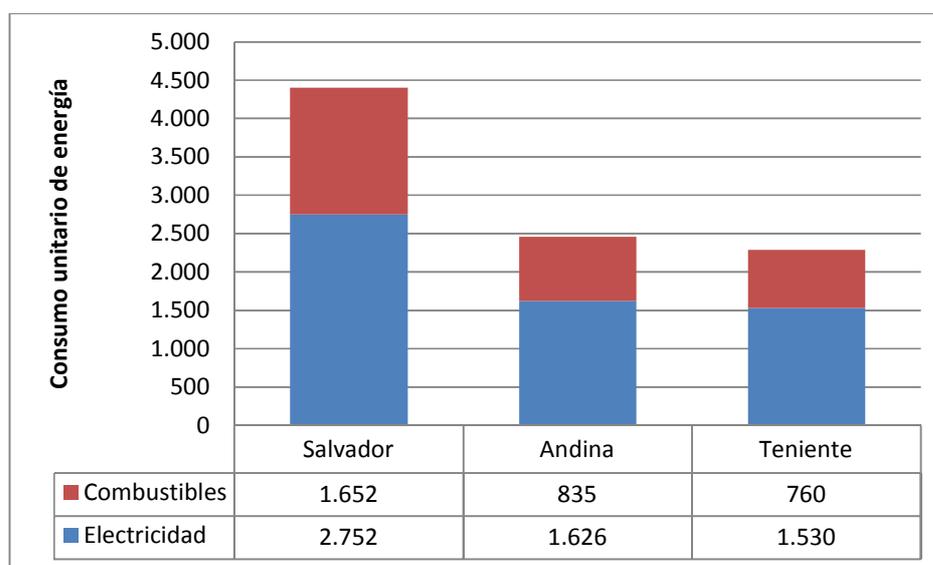


Figura 7-2: Comparación del consumo unitario de energía del proceso de Mina Subterránea en MJ/TMF Cu en el mineral, año 2005 <sup>61</sup>

<sup>61</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco

Para el caso de las minas subterráneas, la demanda energética también está dada por la ley de la roca y la extensión de los yacimientos. A mayor extensión de las minas y a menor ley de la roca, más roca debe ser extraída para obtener una unidad de cobre en el mineral chancado. La diferencia con respecto a las minas rajo está dada por el mayor uso de procesos gravitacionales y transporte de correas, y un menor uso de transporte motorizado.

El mayor consumo de la mina Salvador está dado principalmente por su menor ley comparada con las minas subterráneas de Andina y El Teniente. A partir de los datos ingresados por la Empresa en GaBi para el 2005, Salvador Subterránea tuvo una ley del 0,6%, Andina Subterránea una ley del 1,2%, y El Teniente una ley del 1,0%.

### 7.1.3 Concentración

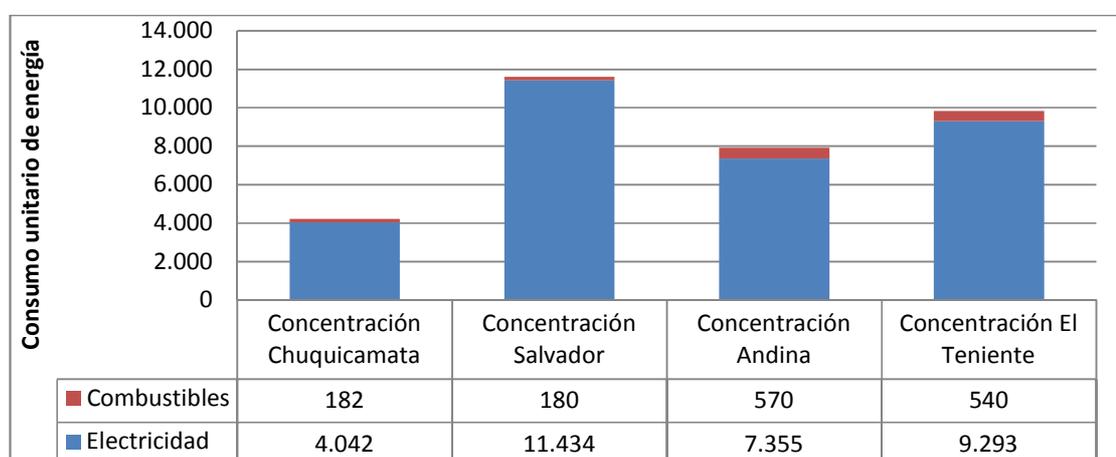


Figura 7-3: Comparación del consumo unitario de energía del proceso de Concentración en MJ/TMF Cu en el concentrado, año 2005 <sup>62</sup>

<sup>62</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco

El gran consumidor de energía dentro del proceso de concentración es la molienda de la roca. Las dos principales variables que definen el consumo energético de la molienda son la dureza y la ley de la roca.

A partir de datos proporcionados directamente por la Empresa, el 2005 el Work Index (unidad para medir la dureza de la roca y cuyas unidades son kWh/ton) fue de 13 para Chuquicamata, 15 para Salvador, 16 para Andina, y 18 para El Teniente. Se puede ver que los consumos energéticos de la figura expresan estas diferencias de dureza, con excepción de Salvador donde su mayor consumo energético está dado por la menor ley de la roca chancada.

Las leyes de la roca tratada fueron el 2005, según datos proporcionados directamente por la Empresa, de 1,1% para el mineral del Rajo Chuquicamata, de 1,4% para el Rajo Sur de Chuquicamata, de 0,6% para Radomiro Tomic, de 0,6% para las minas Rajo y Subterránea de Salvador, de un 1,1% para el Rajo Andina, de un 1,2% para Andina Subterránea, y de un 1,0% para El Teniente. Dentro de las minas que proveen cobre sulfurado, y que por lo tanto son las únicas que proveen de mineral a las concentradoras, se ve que son todas similares al 1,0% salvo Salvador con un 0,6%.

### 7.1.4 Hidrometalurgia

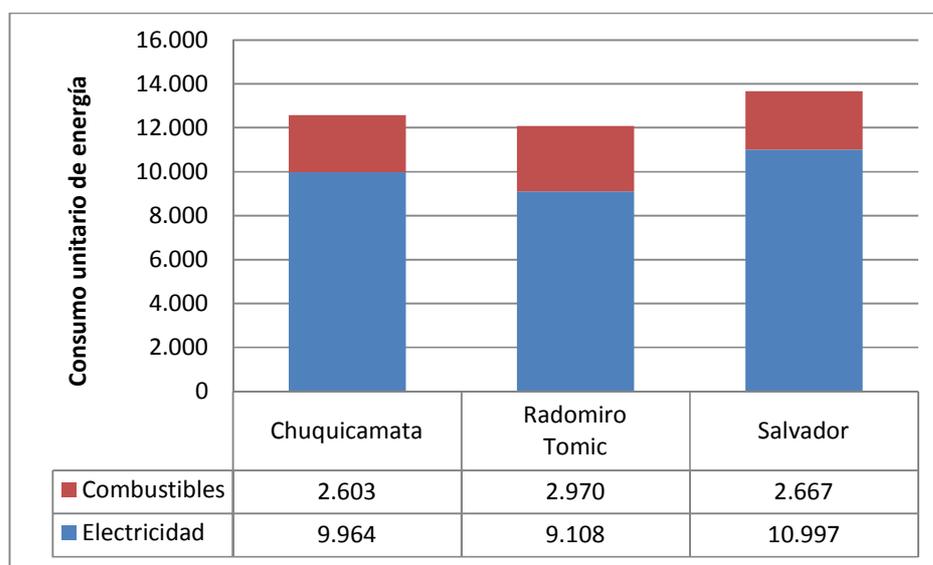


Figura 7-4: Comparación del consumo unitario de energía del proceso de Hidrometalurgia en MJ/TMF Cu en el cátodo EO, año 2005 <sup>63</sup>

La hidrometalurgia posee un gran consumo energético durante el subproceso de electro obtención. Por otro lado el mayor consumo de combustible también se da durante la electro obtención, donde se requiere que la solución se encuentre entre los 40°C y 45°C.

Los resultados de las hidrometalurgias en consumo energético unitario arrojaron valores bastante similares.

En el capítulo 10, como trabajo adicional en esta Tesis, se muestran los consumos energéticos de las hidrometalurgias de Chuquicamata y Radomiro Tomic desagregados en sus tres sub procesos (lixiviación, extracción por solventes, y electro obtención).

<sup>63</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco

### 7.1.5 Fundición (excluye Plantas de Ácido)

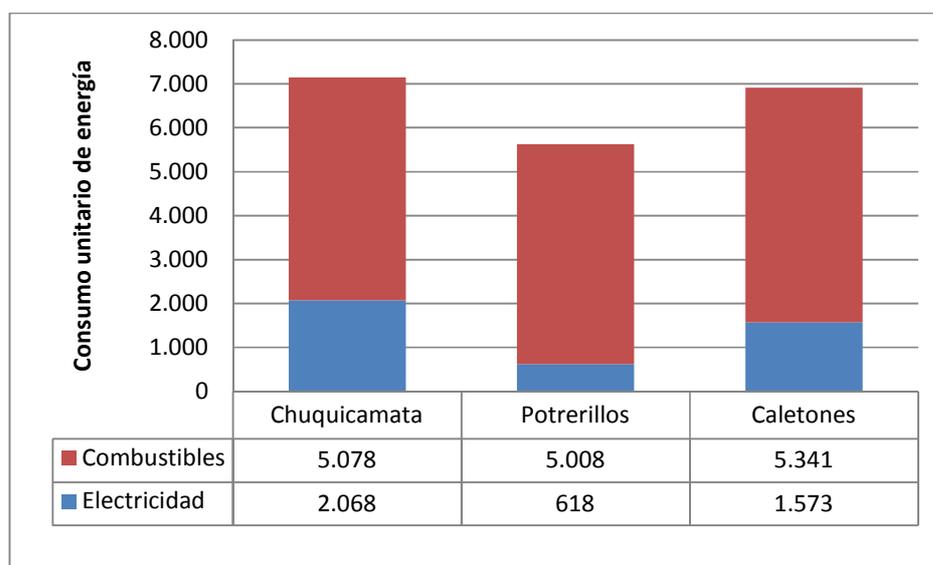


Figura 7-5: Comparación del consumo unitario de energía del proceso de Fundición en el Cátodo ER en MJ/TMF Cu, año 2005 <sup>64</sup>

La electricidad consumida en las fundiciones se utiliza para la generación de aire a alta y baja presión, para las plantas de oxígeno, para el secado del concentrado anterior a la fusión, y para la planta de limpieza de gases. En cuanto al consumo de combustible, este está presente durante la conversión (horno Pierce Smith) y refinado a fuego, no así en la fusión (convertidores Teniente) donde el calor es proporcionado por la misma combustión de los compuestos presentes.

Notar que no está presente la fundición de Ventanas, cuya cuantificación tanto de consumo de energía como de emisiones de GEI no lo ha hecho Codelco utilizando GaBi ni tampoco se hace en esta Tesis.

<sup>64</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco

### 7.1.6 Plantas de Ácido

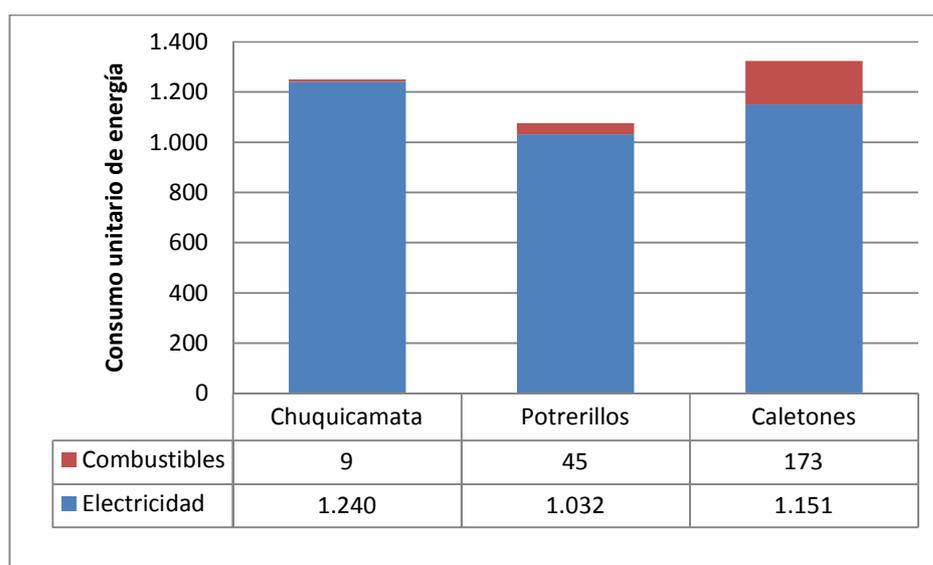


Figura 7-6: Comparación del consumo unitario de energía del proceso de Planta de Ácido en MJ/TMF Cu en el ánodo, año 2005 <sup>65</sup>

Existe un importante consumo de electricidad en los precipitadores electrostáticos. Dentro de las plantas de ácido de la Empresa, Caletones (División El Teniente) tiene la singularidad de estar compuesta por dos plantas de ácido, donde una tiene el doble de capacidad que la otra. El valor mostrado en el gráfico representa el promedio ponderado de ambas plantas de ácido en Caletones.

Notar que no está presente la Planta de Ácido de la fundición de Ventanas, fundición cuyos consumos energéticos y emisiones de GEI no fueron cuantificados utilizando GaBi.

<sup>65</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco

### 7.1.7 Electro Refinería

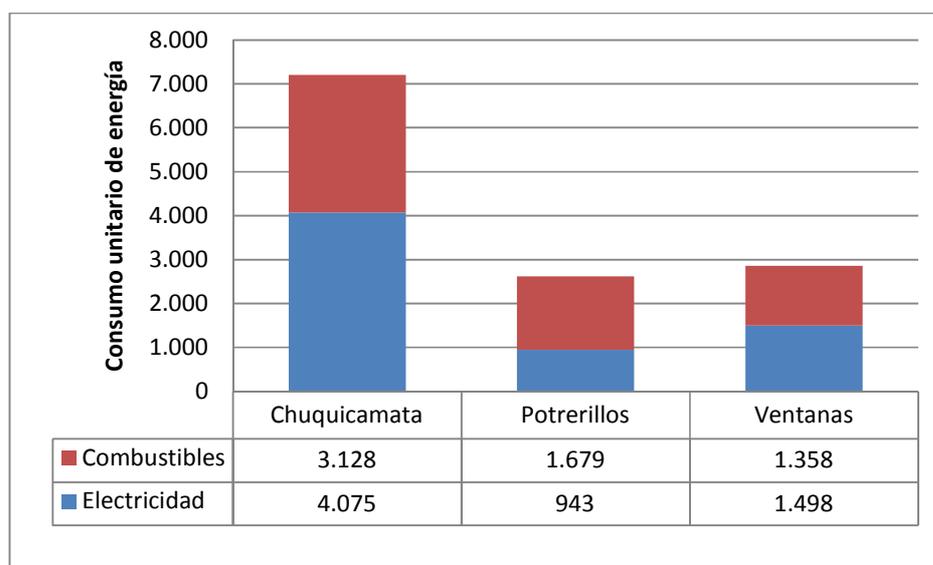


Figura 7-7: Comparación del consumo unitario de energía del proceso de Electro Refinería en MJ/TMF Cu en el cátodo ER, año 2005 <sup>66</sup>

Los consumos energéticos dentro de las electro refinerías tienen por fin calentar la solución dentro de cierto rango, así como de generar las condiciones de diferencia de potencial para el paso del  $\text{Cu}^{2+}$  desde el ánodo hacia el cátodo. Las electro refinerías de Potrerillos y Ventanas utilizan el proceso tradicional, donde tanto el ánodo como el cátodo son planchas de cobre. La diferencia de potencial en estos casos es por lo tanto muy pequeña, y tiene que ver solamente con la resistencia propia del medio (solución ácida) donde circula el ión de cobre. Por otro lado Chuquicamata utiliza un proceso que requiere mayor consumo de energía, donde el cátodo es una plancha de acero y el ánodo una plancha de cobre, existiendo una diferencia de potencial mayor en relación al proceso tradicional.

<sup>66</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco

Se debe agregar que la electro refinería de Ventanas utiliza un proceso de recirculación de agua/vapor, permitiendo mayor eficiencia en el uso del calor.

### **7.1.8 Servicios**

A continuación se presentan los consumos energéticos por unidad de producto propio de los Servicios. Se pueden ver enormes diferencias ya que se trata de un “proceso” que carece de una definición clara sobre qué debe ser asignado como servicio propiamente tal, o bien qué puede ser traspasado a otro proceso en particular.

En el caso de Codelco, existen divisiones donde muchas de sus áreas proporcionan servicios que son transversales a distintos procesos; luego no es fácil realizar una asignación a un proceso o procesos en particular, y por lo tanto quedan asignados como Servicios. Por otro lado, en otras divisiones las áreas afines a los mismos servicios están definidos de manera mucho más clara pudiendo ser asignados a un proceso o procesos en particular.

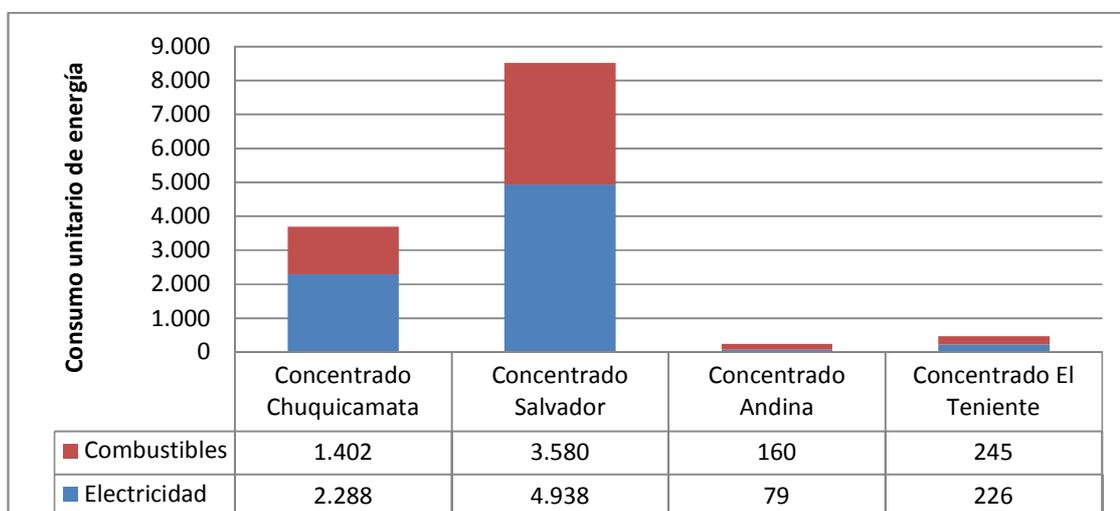


Figura 7-8: Comparación del consumo unitario de energía del proceso de Servicios en MJ/TMF Cu en el concentrado de cobre, año 2005 <sup>67</sup>

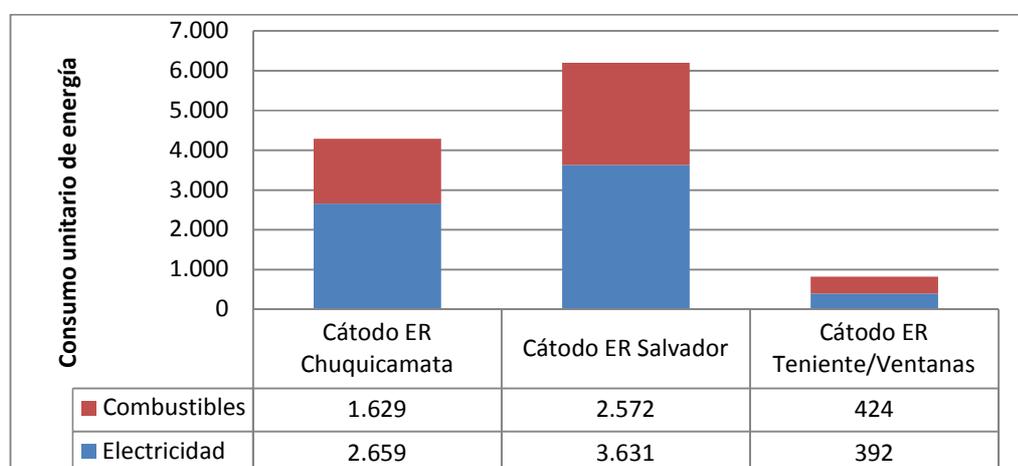


Figura 7-9: Comparación del consumo unitario de energía del proceso de Servicios en MJ/TMF Cu en el cátodo ER, año 2005 <sup>68</sup>

<sup>67</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco

<sup>68</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco

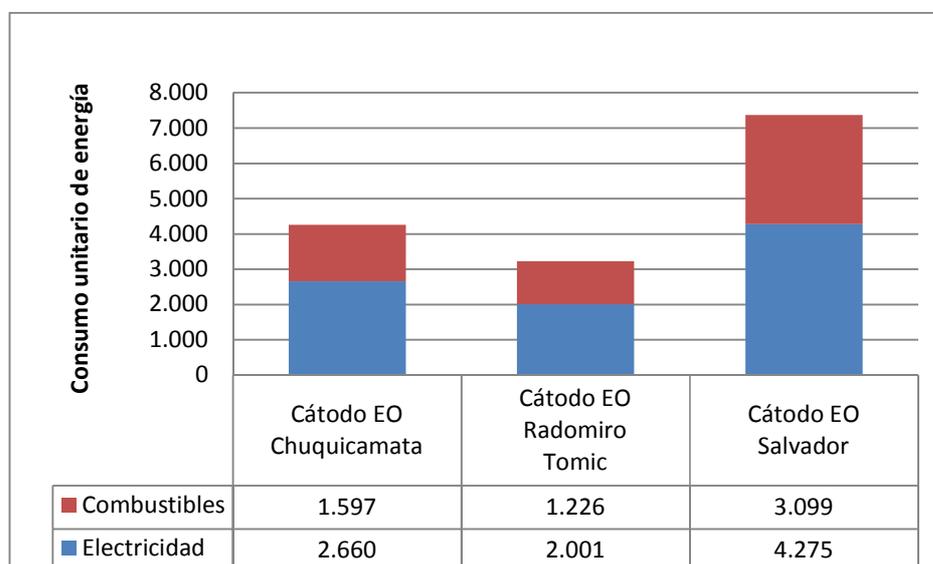


Figura 7-10: Comparación del consumo unitario de energía del proceso de Servicios en MJ/TMF Cu en el cátodo EO, año 2005 <sup>69</sup>

## 7.2 Consumo energético promedio ponderado de los procesos en la Empresa y los de COCHILCO

A continuación se presenta una tabla donde es posible ver los consumos energéticos promedio ponderados para cada proceso dentro de la Empresa, y luego estos valores comparados con los reportados por COCHILCO como la media nacional de cada proceso. Todos los valores presentados corresponden al año 2005.

Para la obtención de los valores promedio ponderado de los procesos dentro de la Empresa, se utilizaron los volúmenes de producción de cada división. Se debe notar que

<sup>69</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco

dentro de las columnas los valores no son sumables para un producto determinado, ya que cada fila está en relación a una fase distinta (mineral, concentrado, ánodo, cátodo).

Tabla 7-1: Comparación Consumos Energéticos de procesos en MJ/TMF Cu, año 2005<sup>70</sup>

Proceso	Codelco utilizando GaBi <sup>71</sup>			Media nacional según COCHILCO		
	Electricidad	Combustible	Total	Electricidad	Combustible	Total
<b>Mina Rajo</b> MJ/TMF mineral	729	5.953	6.682	640	4.196	4.836
<b>Mina Subterránea</b> MJ/TMF mineral	1.652	850	2.503	1.559	1.333	2.892
<b>Concentración</b> MJ/TMF concentrado	6.763	378	7.140	7.241	216	7.457
<b>Hidrometalurgia</b> MJ/TMF cátodo EO	9.471	2.845	12.316	10.082	2.906	12.988
<b>Fundición y Planta de Ácido</b> MJ/TMF ánodo	2.823	5.286	8.109	3.772	4.965	8.737
<b>Electro Refinería</b> MJ/TMF cátodo ER	2.790	2.364	5.153	1.270	1.752	3.022
<b>Servicios</b> MJ/TMF producto	1.701	1.131	2.832	576	278	854

<sup>70</sup> Fuente: Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco, y Anuario de estadísticas del cobre y otros minerales 1990-2009, COCHILCO, para la media de Chile.

<sup>71</sup> Valores promedio de cada proceso dentro de la Empresa.

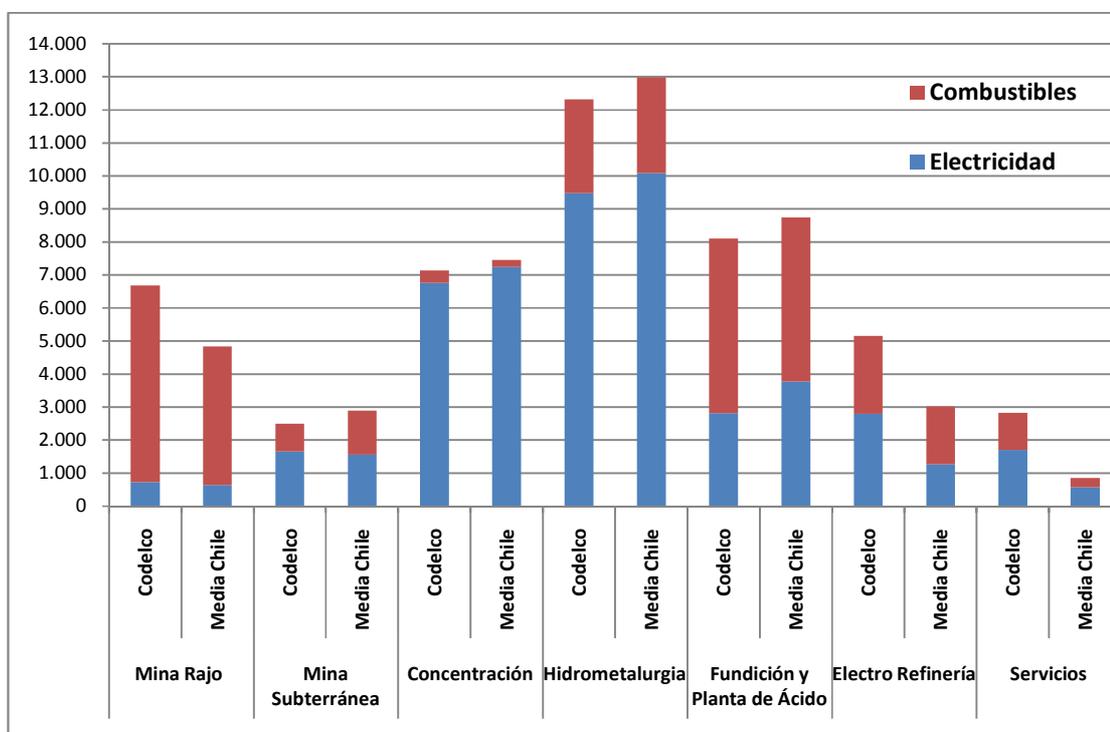


Figura 7-11: Comparación de consumos energéticos de procesos entre Codelco y la media nacional, en MJ/TMF Cu, año 2005 <sup>72</sup>

Se puede observar que en general, los procesos resultan ser bastante similares. Existen tres procesos donde se observan diferencias significativas. En primer lugar, la Mina Rajo, donde las diferencias están dadas por la diferencia entre los promedios de Codelco y a nivel nacional en cuanto a tamaño de estas minas, y las características de la roca (ley y relación estéril/mineral) con las que operan.

En segundo lugar, destaca la diferencia entre las electro refinerías reportadas entre Codelco y COCHILCO. El valor de Codelco resulta ser bastante mayor, y en un

<sup>72</sup> Valores de Mina Rajo y Mina Subterránea en MJ/TMF mineral, Concentración en MJ/TMF concentrado, Hidrometalurgia en MJ/TMF cátodo EO, Fundición y Planta de Ácido en MJ/TMF ánodo, Electro Refinería en MJ/TMF cátodo ER, y Servicios en MJ/TMF producto.

principio llama la atención ya que las únicas electro refinерías existentes en Chile son las tres de Codelco y por lo tanto el valor resultante para Codelco y el reportado por COCHILCO deberían ser los mismos o muy similares. Sin embargo, las cantidades de cobre para la ponderación son distintas en cada caso. Se debe recordar que para la Electro Refinería de Ventanas solamente han sido considerados en la cuantificación utilizando GaBi los cátodos que tienen por origen los ánodos provenientes de Caletones (División El Teniente). La Electro Refinería de Ventanas en la realidad también opera con ánodos provenientes de las fundiciones de Ventanas y de Potrerillos, cantidades adicionales que sí fueron considerados en el cálculo de COCHILCO. De esta manera, para el cálculo promedio ponderado dentro de este trabajo se le resta peso a la Electro Refinería de Ventanas, y toma más peso la Electro Refinería de Chuquicamata la cual posee un consumo energético unitario mucho mayor.

Por último, y con la mayor diferencia reportada en términos de relación, están los Servicios. Esta diferencia no llama la atención dada la ambigüedad con la que son definidos los Servicios entre un caso y otro.

En síntesis, la comparación entre los consumos energéticos obtenidos para Codelco en relación a los reportados por COCHILCO, resultan bastante similares, y en aquellos casos donde se observan diferencias de importancia existen razones que las explican.

**PARTE II: CÁLCULO DE LAS EMISIONES DE GEI Y CONSUMO DE  
ENERGÍA DE PRODUCTOS Y PROCESOS NO MODELADOS POR  
CODELCO UTILIZANDO GABI**

## 8. MARCO TEÓRICO PARTE II

Con el objeto de contribuir con nuevos cálculos, en esta segunda parte de la Tesis se desarrollan estimaciones de emisiones de GEI y de consumo de energía final de productos y procesos no modelados con datos de Codelco utilizando GaBi. Los cálculos de la Parte II no se realizan utilizando GaBi y se resumen en dos grandes ítems.

En primer lugar, se estima la huella de carbono del molibdeno producido en la Empresa. El molibdeno se presenta como dos tipos de producto: concentrado de molibdeno, y óxido de molibdeno. Se estima la huella de carbono de ambos productos.

En segundo lugar, se estima la huella de carbono y el consumo de energía final de dos de los tres procesos de Hidrometalurgia de Codelco que fueron modelados utilizando GaBi, de manera desagregada en Lixiviación (LX), Extracción por Solventes (SX), y Electro Obtención (EW). Estas hidrometalurgias son las de Radomiro Tomic y Chuquicamata, las dos más grandes que posee la Empresa.

La fórmula utilizada para calcular la huella de carbono y consumo de energía final no contempló modelar estos productos y procesos para GaBi, pero sí la utilización de cierta información propia de este programa como los factores de emisión para combustibles y electricidad. En esta parte del trabajo no son considerados (y por lo tanto calculados) los insumos distintos a combustibles y electricidad.

De manera de ser consistente con la Parte I de este trabajo, en la Parte II también se modela para el año 2005. Sin embargo, los datos de consumos de electricidad y combustible proporcionados por Codelco (tanto de la Tostadora en el óxido de molibdeno, como de las Hidrometalurgias) corresponden desde el año 2006 hasta el año 2009, y no del año 2005 específicamente. De manera de asignar un consumo energético

propio de la Tostadora y las Hidrometalurgias desagregadas, es que se toma el valor promedio ponderado de dicho período.

### **Emisiones de la electricidad**

A nivel teórico las emisiones propias del consumo eléctrico son de alcance II, y corresponden a las derivadas por la quema de combustibles fósiles utilizados para la generación de la electricidad consumida. Para ello se aplica la ecuación del siguiente tipo:

$$E_{k2} = FE_k \times NA_k$$

Donde

*FE<sub>k</sub>* = Factor de emisión promedio anual del año k del sistema eléctrico

*NA<sub>k</sub>* = Nivel de actividad de energía eléctrica consumida por el producto proveniente de la matriz eléctrica el año k

*E<sub>k2</sub>* = Emisiones totales del producto de alcance II durante el año k

*k* = Año k

Todos los productos y procesos modelados en esta parte del trabajo se encuentran en el SING. El nivel de actividad del consumo eléctrico se expresa como unidades energéticas, y el factor de emisión como emisión de masa de CO<sub>2</sub>e por unidad de energía eléctrica consumida. Se debe señalar que al tratarse del factor de emisión por unidad de energía eléctrica consumida y no producida, ya viene incorporada la pérdida por transmisión.

Como se señaló, para estimar las emisiones de GEI a causa de los consumos eléctricos (*NA<sub>k</sub>*), se tomó el promedio ponderado entre el período 2006-2009.

A continuación se muestran los factores de emisión del consumo eléctrico en el SING para los años comprendidos entre el 2006 y el 2009. Para ello se utilizaron los factores de emisión determinados por GaBi para la generación de electricidad en Chile según tipo de fuente, y las proporciones de cada tipo de fuente según la información disponible en la CNE. También se muestran los valores del SIC, pese a que no son utilizados en esta Parte II de la Tesis.

Tabla 8-1: Factor de emisión promedio de fuentes eléctricas en Chile según GaBi, en tCO<sub>2</sub>e/GWh producida <sup>73</sup>

FUENTE	FACTOR DE EMISIÓN
Térmica a carbón	1.083,02
Térmica a diesel	1.116,84
Térmica a gas natural	584,50
Hidroelectricidad	22,52

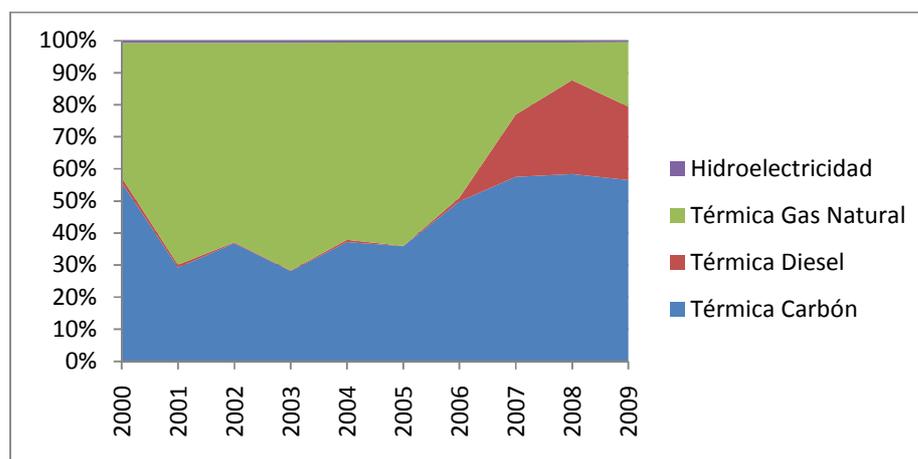


Figura 8-1: Participaciones porcentuales de fuentes en el SING, período 2000-2009 <sup>74</sup>

<sup>73</sup> Fuente: Elaboración propia a partir de información desarrollada por GaBi para Chile, año 2005.

<sup>74</sup> Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la CNE.

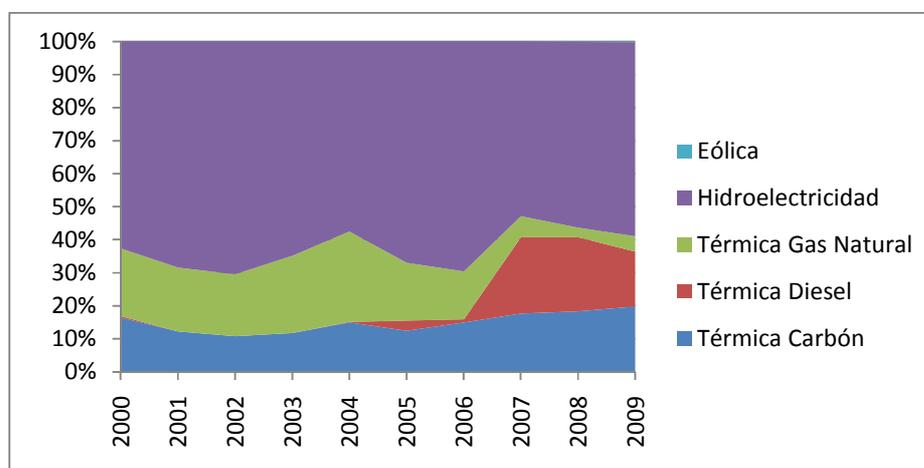


Figura 8-2: Participaciones porcentuales de fuentes en el SIC, período 2000-2009 <sup>75</sup>

En la Figura 8-2 se puede ver una importante disminución de la participación del gas natural desde el año 2006 a causa de los cortes de gas provenientes de Argentina. El uso del gas natural se suplantó por diesel, además de la fuerte entrada de nuevas centrales térmicas a carbón en los años venideros.

Tabla 8-2: Factores de emisión del SING y SIC en tCO<sub>2</sub>e/GWh producida, período 2000-2009 <sup>76</sup>

MATRIZ/AÑO	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
SING	868	732	766	723	771	762	837	972	1.029	986
SIC	318	262	243	279	338	287	274	499	479	441

<sup>75</sup> Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la CNE.

<sup>76</sup> Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la CNE y factores de emisión desarrollados por GaBi para Chile según las distintas fuentes de electricidad.

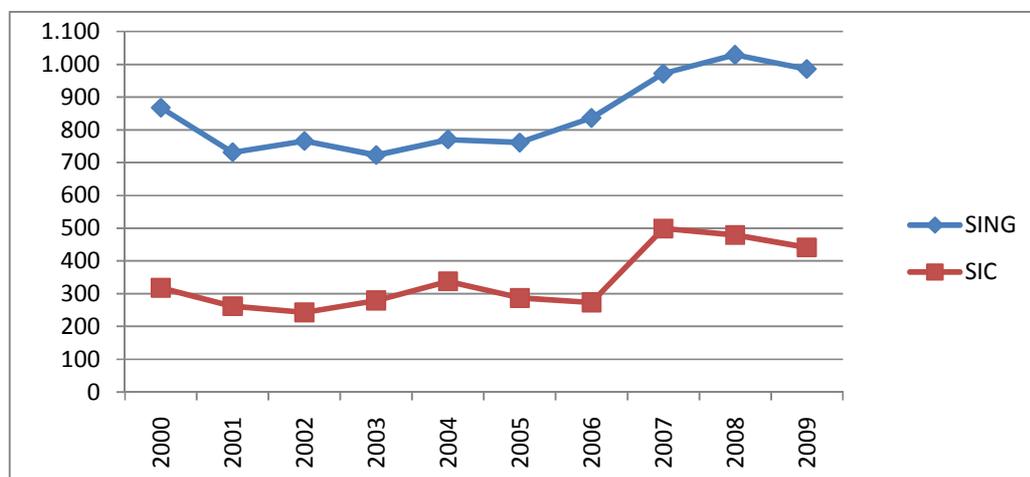


Figura 8-3: Factores de emisión del SIC y SING en tCO<sub>2</sub>e/GWh producida, período 2000-2009 <sup>77</sup>

Los factores de emisión de las matrices se transforman a factores de emisión de consumo considerando las pérdidas de transmisión promedio anuales proporcionadas en los Balances Energéticos de la CNE.

### Emisiones de los combustibles

Para las emisiones de alcance I, esto es los combustibles consumidos directamente dentro de las faenas, se aplica la siguiente ecuación:

$$E_{k1} = \sum_1^N FE_i \times NA_{ik}$$

Donde

<sup>77</sup> Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la CNE y factores de emisión desarrollados por GaBi para Chile según las distintas fuentes de electricidad.

$FE_i$  = Factor de emisión del combustible  $i$ , con  $i = 1..N$

$NA_{ik}$  = Nivel de actividad de combustible  $i$  dentro del año  $k$

$E_{k1}$  = Emisiones totales del producto de alcance I durante el año  $k$

$i$  = Combustible  $i$ , con  $i$  hasta los  $N$  tipos de combustibles consumidos

$k$  = Año  $k$

Los niveles de actividad están en términos de energía. Por otro lado, los factores de emisión de los combustibles están en términos de masa de CO<sub>2</sub> equivalente por unidad de energía de combustible consumida. Al ser CO<sub>2</sub> equivalente, incorpora todos los GEI con PCG definido (para el caso particular de la combustión, el CO<sub>2</sub>, el CH<sub>4</sub> y el N<sub>2</sub>O). Además incorpora los factores de oxidación según el tipo de combustible (IPCC, 1996).

A continuación se señalan los factores de emisión de CO<sub>2</sub> que se utilizan para los combustibles.

Tabla 8-3: Factores de Emisión de CO<sub>2</sub> de los combustibles según IPCC 1996 <sup>78</sup>

COMBUSTIBLE	F.E. IPCC 1996 (tC/TJ)	Fracción Carbono Oxidado IPCC 1996	Masa CO <sub>2</sub> / Masa C	F.E. tCO <sub>2</sub> /TJ
Gas Licuado	17,2	0,995	3,67	62,75
Petróleo Diesel	20,2	0,99	3,67	73,33
Kerosene	19,6	0,99	3,67	71,15
Gasolina	18,9	0,99	3,67	68,61
Gas Natural	15,3	0,995	3,67	55,82

En la tabla anterior se muestran los factores de emisión de CO<sub>2</sub> de la quema de los combustibles utilizados. Por otro lado, dada que las combustiones no son completas y se generan gases de CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O, se debe aplicar además un factor de emisión que incorpore

<sup>78</sup> Fuente: IPCC 1996. Factores por defecto de la Industria Manufacturera (Tablas 1-7 y 1-8) Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories:Reference Manual Págs. 1.35 y 1.36

la contribución de PCG (potencial de calentamiento global) de estos gases. Para ello, se utilizan los factores de emisión por defecto del IPCC 1996 para la Industria Manufacturera, de la Construcción y Minas.

Tabla 8-4: Factores de Emisión de CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O para la Industria según IPCC 1996<sup>79</sup>

<b>GAS</b>	<b>F.E. IPCC 1996 (kg/TJ)</b>	<b>P.C.G. IPCC 1996</b>	<b>F.E. tCO<sub>2</sub>e/TJ</b>
CH <sub>4</sub>	2	21	0,042
N <sub>2</sub> O	0,6	310	0,186

Se puede desprender que por cada TJ de combustible quemado es necesario sumar 0,23 tCO<sub>2</sub>e al factor de emisión de CO<sub>2</sub> por la quema del combustible (suma de los factores de emisión del CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O en tCO<sub>2</sub>e/TJ).

De manera de ser consistente con la manera de cómo se ha estimado la huella de carbono de los distintos productos de la Empresa en el trabajo, es necesario además agregar la huella de carbono de cada combustible previa a su combustión. La huella de carbono previa a la combustión incluye la fabricación, la extracción del combustible primario, las emisiones fugitivas, los traslados, entre otros. En la siguiente tabla se muestra la emisión, en términos de tCO<sub>2</sub>e/TJ, de la fabricación de cada combustible, y la huella de carbono total del consumo de una unidad energética de cada uno de ellos.

---

<sup>79</sup> Fuente: IPCC 1996. Factores por defecto de la Industria Manufacturera (Tablas 1-7 y 1-8) Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories:Reference Manual Págs. 1.35 y 1.36. Los factores de emisión por defecto del CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O para la Industria aplican con los mismos valores para los casos del gas licuado, petróleo diesel, kerosene, y gasolina, que son los tipos de combustible consumidos en la Tostadora.

Tabla 8-5: Factores de Emisión total en tCO<sub>2</sub>e/TJ de los combustibles <sup>80</sup>

COMBUSTIBLE	F.E. de CO2 IPCC 1996 tCO <sub>2</sub> /TJ	F.E. Otros GEI IPCC 1996 tCO <sub>2</sub> e/TJ	F.E. GaBi Huella previa a la quema tCO <sub>2</sub> e/TJ <sup>81</sup>	F.E. Total tCO <sub>2</sub> e/TJ
<b>Gas Licuado</b>	62,75	0,23	8,13	<b>71,11</b>
<b>Petróleo Diesel</b>	73,33	0,23	7,87	<b>81,43</b>
<b>Kerosene</b>	71,15	0,23	7,20	<b>78,58</b>
<b>Gasolina</b>	68,61	0,23	7,04	<b>75,88</b>
<b>Gas Natural</b>	55,82	0,14	11,17	<b>67,13</b>

Como se ve, el factor de emisión utilizado en esta Parte II para los combustibles está construido desde dos fuentes distintas: el IPCC 1996 para su combustión, y GaBi para la huella propia de su fabricación previa.

### **Emisión total de un producto o proceso**

Corresponde a la suma de las emisiones de alcance I y alcance II.

$$E_{Tk} = E_{k1} + E_{k2}$$

Donde

$E_{Tk}$  = Emisión total del producto o proceso en el período  $k$  (no se ha incluido en esta Parte II de la Tesis las emisiones provenientes de la fabricación y transporte de insumos).

<sup>80</sup> Fuente: Elaboración propia a partir de datos del IPCC 1996 y GaBi.

<sup>81</sup> Existen otras fuentes que estiman la huella de carbono propia de la extracción, transporte y fabricación de los combustibles (“upstream emissions”), como el estudio para el caso de Francia “Evaluation des émissions de CO<sub>2</sub> des filières énergétiques conventionnelles et non conventionnelles de production de carburants à partir de ressources fossiles, IFP report 55 949, Abril de 2001, página 44”. Este estudio estima en 13 tCO<sub>2</sub>e/TJ estas emisiones para la gasolina y el diesel, y en 9 tCO<sub>2</sub>e/TJ para el gas licuado.

## **9. PRODUCCIÓN DE MOLIBDENO EN LA EMPRESA**

Codelco produce una serie de co-productos asociados a la producción del cobre. Un co-producto se trata de un producto que no constituye el fin de producción de la organización, pero que se produce aprovechando los procesos presentes en la producción del producto principal.

Dentro de los co-productos de la Empresa destaca el molibdeno, y en segundo orden el oro y la plata. En el caso del ácido sulfúrico, este nace a raíz de la exigencia que impone la norma la calidad primaria del SO<sub>2</sub> en todo el país, pero que luego también se ha aprovechado como un producto de valor comercial para la Empresa, y como insumo para sí misma en sus procesos.

Los co-productos pueden representar oportunidades para las empresas a futuro como créditos en cuanto a sus emisiones de GEI como organizaciones. Producir un producto como co-producto tiene asociado ahorros en cuanto a consumo de energía y recursos comparado a producirlo como producto principal, ya que la energía y recursos utilizados son aprovechados para producir varios productos a la vez y por ende las asignaciones de los consumos deben ser distribuidas en mayor número de unidades.

Una posible manera de cómo operarán los créditos trata con la diferencia de huella de carbono entre las distintas alternativas de producción. Si la huella de carbono promedio a nivel mundial de un producto es mayor a la asignada como co-producto, aquellas emisiones de diferencia podrían ser contabilizadas como créditos para la organización. La lógica que opera con los co-productos es que si no son producidos, de todos modos otro lo tiene que producir para satisfacer la demanda, y ese otro se representa por la huella de carbono media existente a nivel mundial del producto.

Dentro de Codelco el molibdeno es el segundo producto tras el cobre en cuanto a ventas<sup>82</sup>. El 2005 se reportó el mayor volumen de producción de molibdeno en la Empresa durante esa década con 36.566 TMF Mo, representando el 76,11% de la producción nacional ese año<sup>83</sup>.

El molibdeno es producido dentro de la Empresa en forma de dos productos: concentrado de molibdeno, y óxido de molibdeno. En la siguiente tabla se muestra la producción del molibdeno dentro de la Empresa según tipo de producto y división, para el período entre el 2005 y el 2009.

Tabla 9-1: Producción de Molibdeno dentro de la Empresa en el período 2005-2009, en TMF Mo <sup>84</sup>

<b>AÑO</b>	<b>Chuquicamata Concentrado Mo</b>	<b>Chuquicamata Óxido Mo</b>	<b>Salvador Concentrado Mo</b>	<b>Andina Concentrado Mo</b>	<b>El Teniente Concentrado Mo</b>	<b>Total Empresa</b>	<b>Total Nacional</b>
<b>2005</b>	<b>17.854</b>	<b>8.971</b>	<b>1.248</b>	<b>3.244</b>	<b>5.249</b>	<b>36.566</b>	<b>48.041</b>
<b>2006</b>	<b>10.583</b>	<b>7.197</b>	<b>1.366</b>	<b>3.308</b>	<b>4.749</b>	<b>27.203</b>	<b>43.278</b>
<b>2007</b>	<b>11.821</b>	<b>7.244</b>	<b>1.214</b>	<b>2.525</b>	<b>5.053</b>	<b>27.857</b>	<b>44.912</b>
<b>2008</b>	<b>7.278</b>	<b>5.662</b>	<b>872</b>	<b>2.133</b>	<b>4.580</b>	<b>20.525</b>	<b>33.687</b>
<b>2009</b>	<b>5.934</b>	<b>7.134</b>	<b>1.148</b>	<b>2.163</b>	<b>5.179</b>	<b>21.558</b>	<b>34.925</b>

<sup>82</sup> Fuente: Anuario de estadísticas del cobre y otros minerales 1990-2009, COCHILCO

<sup>83</sup> Fuente: Anuario de estadísticas del cobre y otros minerales 1990-2009, COCHILCO

<sup>84</sup> Fuente: Anuario de estadísticas del cobre y otros minerales 1990-2009, COCHILCO

La producción de molibdeno en Codelco ha promediado una cantidad de 26.742 TMF Mo durante los últimos 5 años.

El molibdeno, como un co-producto de la producción de cobre, comparte una parte importante de su proceso productivo con el del cobre. El molibdeno se encuentra como un mineral adicional dentro de la roca extraída, para luego ser chancado. Continúa junto al cobre en el proceso de Concentración en la molienda y flotación. Dentro de la flotación, comparte el mismo proceso con el cobre hasta la flotación secundaria dentro de la Planta Moly, lugar donde son separados.

### **9.1 Concentrado de Molibdeno (MoS<sub>2</sub>)**

El concentrado de molibdeno, compuesto principalmente de molibdenita (MoS<sub>2</sub>), sale como un co-producto del proceso de flotación secundaria dentro de la Planta Moly. Los procesos de Concentración modelados en la Parte I utilizando GaBi incorporan la totalidad de sus respectivas Planta Moly, incluyendo los filtros Lasta y Larox por donde pasa el concentrado de molibdeno recién extraído. Por lo tanto, no es necesario estimar las emisiones de ningún proceso adicional para el cálculo de la emisión unitaria de este producto.

Lo que sí es necesario es establecer un criterio de asignación de emisiones de toda la huella de carbono acumulada desde el comienzo del proceso de Extracción hasta el final del proceso de Concentración. Para esto, existen dos criterios de asignación: asignación por masa, y asignación por ventas.

### Asignación por masa

El criterio de asignación por masa distribuye equitativamente la emisión por una unidad de masa independiente de qué producto o material se trate. Para ello, solamente es necesario conocer las cantidades de los distintos productos a los cuales se les asignarán emisiones de GEI. En la siguiente tabla se muestra la producción de concentrado de cobre y de concentrado de molibdeno en cada división dentro de la Empresa.

Tabla 9-2: Producción de concentrado de cobre y concentrado de molibdeno en la Empresa por divisiones, año 2005 <sup>85</sup>

<b>PLANTA DE CONCENTRACIÓN</b>	<b>Concentrado Cu TMF Cu</b>	<b>Concentrado Mo TMF Mo</b>	<b>Total Concentrado TMF</b>
<b>Chuquicamata</b>	556.783	26.825 <sup>86</sup>	583.608
<b>Salvador</b>	53.170	1.248	54.418
<b>Andina</b>	248.175	3.244	251.419
<b>El Teniente</b>	442.452	5.249	447.701

Al considerarse también la producción de concentrado de molibdeno, se agregan unidades de masa donde distribuir la emisión total acumulada hasta el proceso de Concentración. En la siguiente tabla se ve en la primera columna la emisión unitaria del concentrado de cobre calculada originalmente en esta Tesis (Parte I), y en la segunda columna la emisión unitaria de concentrado (indistintamente de qué mineral) considerando también la producción del concentrado de molibdeno.

<sup>85</sup> Fuente: Elaboración propia a partir del Anuario de estadísticas del cobre y otros minerales 1990-2009 (COCHILCO) para el concentrado de molibdeno, y datos ingresados al modelo para GaBi por la Empresa para el caso del concentrado de cobre.

<sup>86</sup> Incluye el concentrado de molibdeno utilizado como insumo para la producción de óxido de molibdeno en la misma división.

Tabla 9-3: Emisión unitaria excluyendo e incorporando al concentrado de molibdeno producido en cada división de la Empresa, en kg CO<sub>2</sub>e/TMF, año 2005. Criterio de asignación por masa <sup>87</sup>

<b>PLANTA DE CONCENTRACIÓN</b>	<b>Emisión Unitaria sin asignaciones</b>	<b>Emisión Unitaria con asignaciones</b>
<b>Chuquicamata</b>	<b>2.548</b>	<b>2.431</b>
<b>Salvador</b>	<b>2.516</b>	<b>2.458</b>
<b>Andina</b>	<b>1.313</b>	<b>1.296</b>
<b>El Teniente</b>	<b>1.299</b>	<b>1.284</b>

La columna “Emisión Unitaria sin asignaciones” muestra el valor original (Parte I de esta Tesis) de la huella de carbono de 1 TMF Cu de concentrado de cobre producido. La columna “Emisión Unitaria con asignaciones” muestra el valor de la huella de carbono en kg CO<sub>2</sub>e/TMF de Cu o de Mo, indistintamente si es concentrado de cobre o concentrado de molibdeno. Al haber asignaciones se está considerando también a la producción de concentrado de molibdeno dentro del total, por lo cual toda la huella de carbono acumulada desde la Extracción hasta la Concentración se divide por un número mayor de unidades.

### **Asignación por ventas**

Un segundo criterio para asignar las emisiones de GEI es por ventas. En este caso la emisión unitaria por unidad de masa no es la misma dependiendo si es concentrado de cobre o concentrado de molibdeno. La emisión unitaria depende del precio de venta del mineral y su cantidad producida.

---

<sup>87</sup> Fuente: Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco para las emisiones unitarias sin asignaciones, más el Anuario de estadísticas del cobre y otros minerales 1990-2009, COCHILCO, para las emisiones unitarias con asignaciones.

Para el cálculo de la emisión unitaria (por unidad de masa) según el criterio de asignación por ventas, se aplica la siguiente fórmula:

$$E_{uA} = P_{uA} \times E_t / I_t$$

Donde

$E_{uA}$  = Emisión unitaria del producto A, en kg CO<sub>2</sub>e/TMF A

$P_{uA}$  = Precio unitario del producto A, en USD\$/TMF A

$E_t$  = Emisión total de los productos, en miles de tCO<sub>2</sub>e

$I_t$  = Ingreso total por la venta de los productos, en MM USD\$

En la siguiente tabla se pueden ver los precios unitarios, tanto del concentrado de cobre como del concentrado de molibdeno, para el año 2005

Tabla 9-4: Precios promedios unitarios del concentrado de cobre y del concentrado de molibdeno, año 2005, en USD\$/TMF a precios del año <sup>88</sup>

Producto	Precio Unitario
Concentrado de Cobre	2.823 <sup>89</sup>
Concentrado de Molibdeno	60.739 <sup>90</sup>

A partir de los precios unitarios señalados, y utilizando las cantidades de producción de concentrado de cobre y concentrado de molibdeno para cada división, es posible obtener

<sup>88</sup> Fuente: Anuario de estadísticas del cobre y otros minerales 1990-2009, COCHILCO.

<sup>89</sup> Valor de venta promedio del año de la producción chilena de Concentrado de Cobre. El Cátodo grado A de cobre se tranzó ese año en la Bolsa de Metales de Londres con un valor promedio de 3.676 USD/libra.

<sup>90</sup> Valor de venta promedio del año de la producción chilena de Concentrado de Molibdeno

la emisión unitaria para cada producto dentro de cada división por el criterio de asignación por ventas.

Tabla 9-5: Emisión unitaria del concentrado de cobre y el concentrado de molibdeno dentro de la Empresa por criterio de asignación por ventas, año 2005 <sup>91</sup>

<b>DIVISIÓN</b>	<b>Emisión total en miles de tCO<sub>2</sub>e <sup>92</sup></b>	<b>Ingreso total MM USD <sup>93</sup></b>	<b>Emisión Unitaria Concentrado de Cobre kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu</b>	<b>Emisión Unitaria Concentrado de Molibdeno kg CO<sub>2</sub>e/TMF Mo</b>
<b>Chuqui</b>	1.419	3.201	<b>1.251</b>	<b>26.916</b>
<b>Salvador</b>	134	226	<b>1.672</b>	<b>35.971</b>
<b>Andina</b>	326	898	<b>1.025</b>	<b>22.053</b>
<b>El Teniente</b>	575	1.568	<b>1.035</b>	<b>22.264</b>
<b>Total</b>	2.453	5.893	<b>1.175</b>	<b>25.285</b>

Se puede observar que en todas las divisiones se da la relación que la emisión unitaria del concentrado de molibdeno es 21,52 veces la emisión unitaria de concentrado de cobre, relación que es a su vez la del precio de venta del concentrado de molibdeno con respecto al precio de venta del concentrado de cobre el año 2005.

En términos de asignaciones, y a partir de los precios del año 2005, para el concentrado de molibdeno conviene claramente la asignación por masa, obteniendo de esa manera una emisión unitaria mucho menor. Por el contrario, para el caso del concentrado de cobre, la asignación por ventas resulta más conveniente. Sin embargo, la Empresa debe ser consistente al momento de presentar una huella de carbono, y por lo tanto debe elegir un mismo tipo de asignación para todos sus productos.

<sup>91</sup> Fuente: Elaboración propia a partir de datos de COCHILCO

<sup>92</sup> Emisión total dentro de las divisiones derivadas solamente de la producción de los concentrados.

<sup>93</sup> Ventas derivadas dentro de las divisiones solamente por la producción de los concentrados. Se asume para el cálculo que la totalidad de los concentrados producidos son vendidos, independiente que parte de ellos sean utilizados como insumo para otros productos dentro de la Empresa.

## 9.2 Óxido de Molibdeno (MoO<sub>3</sub>)

El óxido de molibdeno es el otro producto derivado del molibdeno que produce la Empresa. El concentrado de molibdeno puede ser sometido a un proceso adicional llamado Tostación. De este proceso resulta como producto el óxido de molibdeno, el cual es solamente producido en Chuquicamata.

El proceso de Tostación no ha sido modelado por la Empresa utilizando GaBi. Para poder realizar una estimación de las emisiones propias de este proceso, se han obtenido los consumos de combustible y de electricidad de la planta de Tostación del período 2006-2009. Lamentablemente no estaban disponibles los datos para el año 2005, para lo cual se ha estimado una emisión unitaria de la Tostación a partir del promedio ponderado de los consumos energéticos comprendidos en el período 2006-2009.

La huella de carbono de óxido de molibdeno en la Empresa se estima como la huella de carbono unitaria del concentrado de molibdeno, más la huella de carbono unitaria del proceso de Tostación. Como se vio, se obtuvieron dos huellas de carbono para el concentrado de molibdeno según tipo de asignación. Se consideran ambos casos para el cálculo total de la huella del óxido de molibdeno.

$$E_u MoO_3 = E_u MoS_2 + E_t Tostación / Q\_MoO_3$$

Donde

$E_u MoO_3$  = Emisión unitaria del Óxido de Molibdeno, en kg CO<sub>2</sub>e/TMF Mo

$E_u MoS_2$  = Emisión unitaria del Concentrado de Molibdeno, en kg CO<sub>2</sub>e/TMF Mo

$E_t Tostación$  = Emisión total del proceso de Tostación, en kg CO<sub>2</sub>e

$Q\_MoO_3$  = Cantidad de Óxido de Molibdeno producido, en TMF Mo

Para esta fórmula se ha supuesto una recuperación del 100% del molibdeno contenido en el concentrado de molibdeno que es transformado a óxido de molibdeno.

Los resultados de emisión unitaria y de consumo energético unitario del proceso de Tostación se muestran en las tablas de a continuación.

Tabla 9-6: Emisión unitaria del proceso de Tostación de Chuquicamata en la Empresa, en kg CO<sub>2</sub>e/TMF Mo <sup>94</sup>

FUENTE / AÑO	2006	2007	2008	2009	Promedio ponderado
<b>Combustibles</b>	531	1.038	786	517	<b>715</b>
<b>Electricidad</b>	464	356	463	338	<b>402</b>
<b>TOTAL</b>	995	1.394	1.249	854	<b>1.117</b>

Tabla 9-7: Consumo energético unitario del proceso de Tostación de Chuquicamata en la Empresa, en MJ/TMF Mo <sup>95</sup>

FUENTE / AÑO	2006	2007	2008	2009	Promedio ponderado
<b>Combustibles</b>	5.891	4.517	5.899	4.305	<b>5.112</b>
<b>Electricidad</b>	2.147	3.609	2.582	1.772	<b>2.528</b>
<b>TOTAL</b>	8.038	8.125	8.481	6.077	<b>7.640</b>

La emisión unitaria de la Tostadora ponderada por la producción de cada año resulta en una emisión de **1.117** kg CO<sub>2</sub>e/TMF Mo. Para finalizar el cálculo de la huella de carbono del óxido de molibdeno, se suma este valor al del concentrado de molibdeno de

---

<sup>94</sup> Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos

<sup>95</sup> Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos

Chuquicamata. Existen dos valores posibles, dependiendo el criterio de asignación que se seleccione para el concentrado de molibdeno.

Tabla 9-8: Emisión unitaria del Óxido de Molibdeno de Chuquicamata en la Empresa, en kg CO<sub>2</sub>e/TMF Mo, año 2005 <sup>96</sup>

CRITERIO	Emisión unitaria Concentrado de Mo	Emisión unitaria Tostadora <sup>97</sup>	Emisión unitaria Óxido de Molibdeno <sup>98</sup>
Asignación por masa	2.431	1.117	3.548
Asignación por ventas	26.916		28.033

Claramente conviene tomar la asignación por masa para el caso del molibdeno, ya que como se vio el valor de venta del molibdeno durante el 2005 fue mucho mayor al del cobre y su producción menor. Se obtiene de este modo una emisión unitaria para el óxido de molibdeno de 3.548 kg CO<sub>2</sub>e/TMF Mo.

### **Créditos: Oportunidades a futuro**

Una posible situación en el mediano plazo dentro del mercado mundial de ciertos productos, particularmente los commodities, es la asignación de créditos a aquellas organizaciones cuyas emisiones de GEI de un determinado producto sean menores al promedio mundial de la huella de carbono de ese producto en ese momento.

<sup>96</sup> Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos

<sup>97</sup> Como se vio, este valor corresponde a un promedio ponderado del período 2006-2009, y no corresponde al año 2005.

<sup>98</sup> Para el cálculo se ha supuesto una recuperación del 100% del molibdeno contenido en el Concentrado de Molibdeno luego de ser tostado.

A partir de conversación personal con Juan Carlos Torres, Jefe de IM2 de Codelco, la emisión promedio mundial del óxido de molibdeno es de 11 tCO<sub>2</sub>e/TMF Mo. Este valor es propio de un informe del IMOA (International Molybdenum Association) el cual no es público a la fecha de la conversación (octubre de 2010). Es un valor ponderado entre la producción primaria de molibdeno (es decir, que el fin de explotación de la mina sea extraer y producir molibdeno) y la producción secundaria (producción como co-producto, el cual es el caso de la Empresa). Este alto valor promedio a nivel mundial se explica debido a la alta emisión de producir el molibdeno como mineral primario, debido a su muy baja ley promedio.

En esta Tesis se ha estimado la huella de carbono del óxido de molibdeno en la Empresa con un valor de 3,5 tCO<sub>2</sub>e/TMF Mo para el 2005. Esto significa una diferencia de 7,5 tCO<sub>2</sub>e/TMF Mo en relación a la media mundial de 11 tCO<sub>2</sub>e/TMF Mo, suponiendo este último valor válido para ese año. Si el volumen de producción de óxido de molibdeno en la Empresa el 2005 fue de 8.971 TMF Mo, hubiese significado a nivel de Empresa una cantidad de 66.854 tCO<sub>2</sub>e como créditos en términos de emisiones para ese año.

Aplicando la misma lógica es posible estimar los créditos producto de la venta del concentrado de molibdeno, comparando la emisión unitaria de este producto a nivel de Empresa con la emisión unitaria promedio a nivel mundial.

## **10. SEPARACIÓN DE LAS EMISIONES DE LA HIDROMETALURGIA EN LA EMPRESA EN LX, SX, Y EW**

Los reportes de emisiones de GEI por procesos en la minería del cobre suelen referirse al proceso de Hidrometalurgia como un todo, sin señalar las emisiones desagregadas de los subprocesos Lixiviación (LX), Extracción por Solventes (SX), y Electro Obtención (EW), los cuales conforman la Hidrometalurgia. En el caso de Codelco, la información con la que fueron modeladas las hidrometalurgias utilizando GaBi no permitía conocer las emisiones de estos subprocesos de manera desagregada.

Proceso de Hidrometalurgia:      Lixiviación → Extracción por Solventes → Electro Obtención
---

Para realizar en esta Tesis los cálculos de los consumos energéticos y emisiones de GEI de los subprocesos, se obtuvo por parte de la Empresa los consumos energéticos, tanto de combustible como de electricidad, de toda la División Norte (Chuquicamata más Radomiro Tomic), entre los años 2006 y 2009. Lamentablemente no se pudo disponer de los datos del año 2005, año tratado en este trabajo. Se trata de una base de datos con más de 2.000 consumos con una descripción respectiva de cada uno. Estos consumos pertenecen a distintos centros de costo, los cuales son transversales a los procesos, siendo en algunos casos los consumos de difícil clasificación cuando se quieren adjudicar a un proceso determinado.

En esta Tesis cada consumo proporcionado por la Empresa fue clasificado, en primer lugar, si pertenece a un proceso de Hidrometalurgia o no. Luego de eso, aquellos clasificados como parte de una Hidrometalurgia fueron clasificados en Lixiviación, Extracción por Solventes, o Electro Obtención. En el Anexo E se muestran las tablas,

para las dos hidrometalurgias de la División Norte, con el detalle de los consumos considerados para el cálculo del consumo de combustible y consumo de electricidad de cada subproceso.

No se pudo disponer de los datos del consumo de insumos por parte de la Empresa para el período 2006-2009, por lo que estos no son considerados en los cálculos de consumo energético y de emisiones de GEI.

Se obtuvo directamente en la Empresa las producciones de Cátodo EO de Chuquicamata y Cátodo EO de Radomiro Tomic para el período 2006-2009. Con estos valores, es posible establecer los consumos energéticos unitarios por proceso, así como las emisiones de GEI unitarias.

Tabla 10-1: Producción de Cátodo EO de Chuquicamata y Cátodo EO de Radomiro Tomic en la Empresa, en TMF Cu <sup>99</sup>

Producto	2006	2007	2008	2009
<b>CÁTODO EO Chuqui</b>	150.170	149.970	145.966	150.710
<b>CÁTODO EO RT</b>	306.651	281.252	240.954	307.535

### 10.1 Hidrometalurgia de Chuquicamata

A continuación se presentan los consumos unitarios de energía y las emisiones unitarias de GEI desagregados por subprocesos en la Hidrometalurgia de Chuquicamata.

---

<sup>99</sup> Fuente: Elaboración propia a partir de datos proporcionados por Codelco

Tabla 10-2: Consumo energético unitario de la Hidrometalurgia de Chuquicamata desagregado en sus subprocesos, en MJ/TMF Cu, promedio ponderado para el período 2006-2009 <sup>100</sup>

Fuente	LX	SX	EW	Total
Electricidad	1.591	319	7.721	9.631
Combustible	292	1	477	770
<b>TOTAL</b>	<b>1.883</b>	<b>320</b>	<b>8.198</b>	<b>10.401</b>

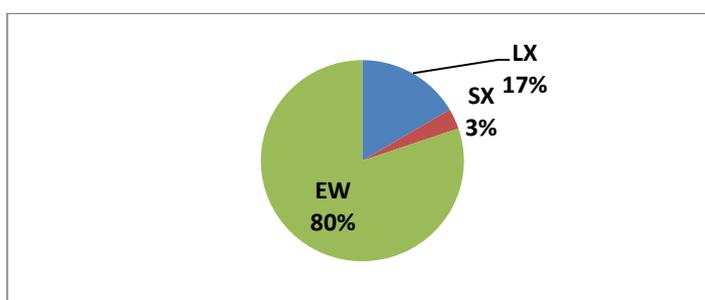


Figura 10-1: Participación porcentual de los subprocesos en el consumo de energía eléctrica de la Hidrometalurgia de Chuquicamata, valor promedio período 2006-2009 <sup>101</sup>

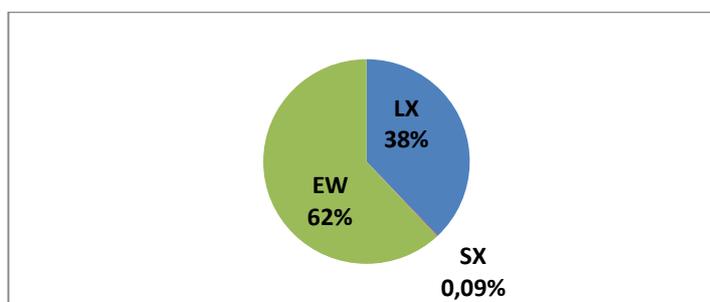


Figura 10-2: Participación porcentual de los subprocesos en el consumo de combustible (en términos de energía) de la Hidrometalurgia de Chuquicamata, valor promedio período 2006-2009 <sup>102</sup>

<sup>100</sup> Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos

<sup>101</sup> Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos

<sup>102</sup> Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos

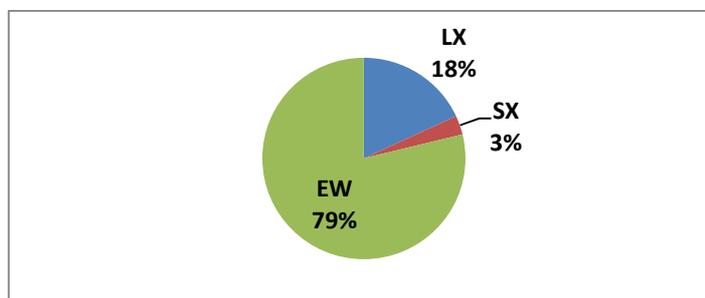


Figura 10-3: Participación porcentual de los subprocesos en el consumo total de energía de la Hidrometalurgia de Chuquicamata, valor promedio período 2006-2009 <sup>103</sup>

Tabla 10-3: Emisiones unitarias de GEI de la Hidrometalurgia de Chuquicamata desagregado en sus subprocesos, en kgCO<sub>2</sub>e/TMF Cu, promedio ponderado para el período 2006-2009 <sup>104</sup>

Fuente	LX	SX	EW	Total
Electricidad	450	90	2.183	2.723
Combustible	24	0	38	62
<b>TOTAL</b>	<b>473</b>	<b>90</b>	<b>2.221</b>	<b>2.784</b>

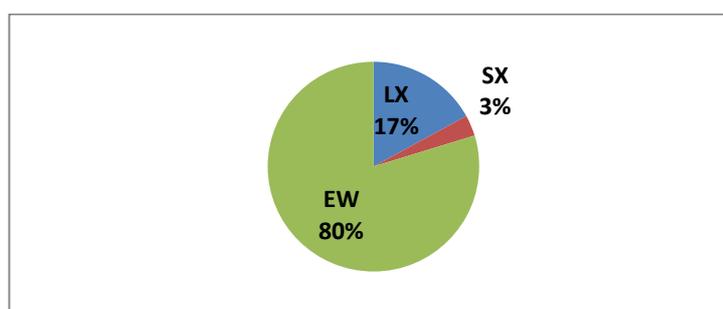


Figura 10-4: Participación porcentual de los subprocesos en las emisiones totales de GEI de la Hidrometalurgia de Chuquicamata, valor promedio período 2006-2009 <sup>105</sup>

<sup>103</sup> Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos

<sup>104</sup> Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos

<sup>105</sup> Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos

Se puede observar que el 79% del consumo de energía ocurre durante la Electro Obtención. En este subproceso el cobre ingresa disuelto en el líquido resultante de la Extracción por Solventes, y se adhiere al cátodo a través de la diferencia de potencial generada con la ruptura de la molécula de agua, más la presencia de una plancha de plomo que actúa como ánodo. La Lixiviación consume el 18% de la energía de la Hidrometalurgia, y la Extracción por Solventes el 3% restante. El consumo eléctrico de la Lixiviación está dado por todo el sistema de transporte del mineral vía correas hasta el tambor aglomerador, para luego ser depositado por pilas que son regadas de manera continua (sistema Heap Leaching).

## 10.2 Hidrometalurgia de Radomiro Tomic

A continuación se presentan los consumos unitarios de energía y las emisiones unitarias de GEI desagregados por subprocesos en la Hidrometalurgia de Radomiro Tomic.

Tabla 10-4: Consumo energético unitario de la Hidrometalurgia de Radomiro Tomic desagregado en sus subprocesos, en MJ/TMF Cu, promedio ponderado para el período 2006-2009 <sup>106</sup>

Fuente	LX	SX	EW	Total
Electricidad	508	391	7.268	8.167
Combustible	64	1	2.070	2.134
<b>TOTAL</b>	<b>571</b>	<b>392</b>	<b>9.337</b>	<b>10.301</b>

---

<sup>106</sup> Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos

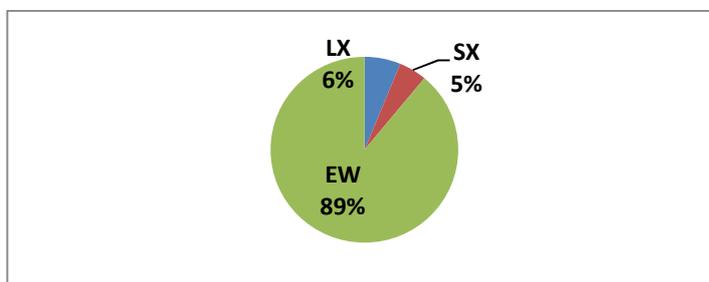


Figura 10-5: Participación porcentual de los subprocesos en el consumo de energía eléctrica de la Hidrometalurgia de Radomiro Tomic, valor promedio período 2006-2009<sup>107</sup>

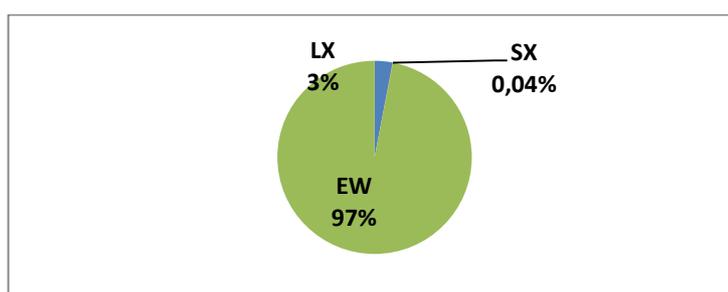


Figura 10-6: Participación porcentual de los subprocesos en el consumo de combustible (en términos de energía) de la Hidrometalurgia de Radomiro Tomic, valor promedio período 2006-2009 <sup>108</sup>

---

<sup>107</sup> Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos

<sup>108</sup> Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos

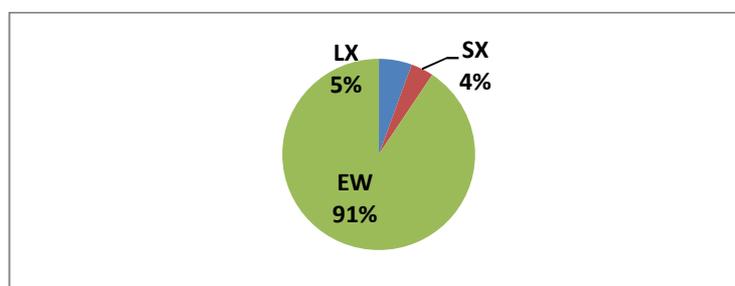


Figura 10-7: Participación porcentual de los subprocesos en el consumo total de energía de la Hidrometalurgia de Radomiro Tomic, valor promedio período 2006-2009 <sup>109</sup>

Tabla 10-5: Emisiones unitarias de GEI de la Hidrometalurgia de Radomiro Tomic desagregado en sus subprocesos, en kgCO<sub>2</sub>e/TMF Cu, promedio ponderado para el período 2006-2009 <sup>110</sup>

Fuente	LX	SX	EW	Total
Electricidad	143	110	2.049	2.303
Combustible	5	0	158	163
<b>TOTAL</b>	<b>149</b>	<b>110</b>	<b>2.208</b>	<b>2.467</b>

<sup>109</sup> Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos

<sup>110</sup> Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos

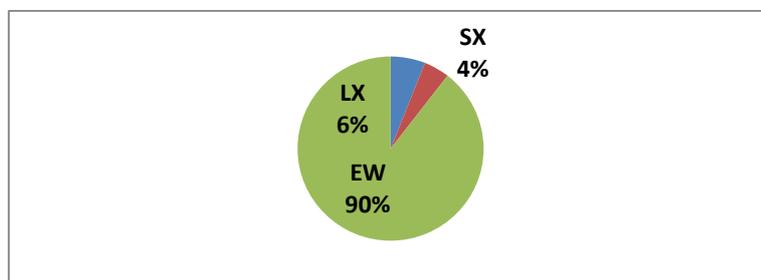


Figura 10-8: Participación porcentual de los subprocesos en las emisiones totales de GEI de la Hidrometalurgia de Radomiro Tomic, valor promedio período 2006-2009 <sup>111</sup>

En la Hidrometalurgia de Radomiro Tomic el 90% del consumo de energía ocurre durante la Electro Obtención. La Lixiviación consume el 6% de la energía, y la Extracción por Solventes el 4% restante. En Radomiro Tomic también opera el sistema Heap Leaching, donde el consumo eléctrico de la Lixiviación está dado por todo el sistema de transporte del mineral vía correas hasta el tambor aglomerador, para luego ser depositado por pilas que son regadas de manera continua. Al comparar los valores con la Hidrometalurgia de Chuquicamata, resulta un consumo energético total muy similar (10.301 MJ/TMF Cu en Radomiro Tomic y 10.401 MJ/TMF Cu en Chuquicamata), sin embargo los consumos energéticos se distribuyen de manera distinta dentro de ellos. En la Hidrometalurgia de Chuquicamata se ve un consumo bastante mayor en la Lixiviación y algo menor en la Electro Obtención, mientras que en Radomiro Tomic es al revés. Las diferencias están dadas por las particularidades de los procesos dentro de cada división.

---

<sup>111</sup> Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos

## 11. CONCLUSIONES

A nivel de Codelco, las emisiones de GEI propia del uso de combustibles representaron el 23% del total, las del consumo de electricidad el 65%, y las de la fabricación y transporte de insumos el 12% para el año 2005. A nivel de productos, los insumos representaron en promedio 521 kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu en el cátodo ER, y 97 kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu en el cátodo EO. El aporte de los insumos resulta ser sobre el 10% del total en las dos mediciones hechas en Chile (Collahuasi y la realizada en este trabajo para Codelco).

Dentro de la fabricación y transporte de insumos, un 95% de las emisiones son aportados por cinco insumos a nivel de Empresa. Estos son, en orden decreciente de importancia, el acero, la cal, el nitrato de amonio, la arena de sílice, y el diesel utilizado para el transporte de los insumos. Sobresale el acero con el 50% de estas emisiones, seguido de la cal con el 28%.

La matriz eléctrica influye significativamente en la huella de carbono de los productos de la Industria del Cobre. A partir de los factores de emisión según tipo de fuente desarrollados por GaBi para Chile, una matriz eléctrica compuesta 100% por térmicas a diesel tiene un factor de emisión 47 veces mayor a una matriz eléctrica compuesta 100% por hidroelectricidad. Para el caso de Codelco el 2005, esto se hubiese traducido en que el concentrado de cobre hubiese aumentado 3,9 veces su huella de carbono utilizando una matriz eléctrica compuesta en un 100% de térmicas a diesel en lugar de una matriz compuesta con 100% de hidroelectricidad. Para el caso del cátodo ER hubiese aumentado 3,4 veces, y para el caso del cátodo EO 5,1 veces.

Ante la proyección de un aumento del consumo energético unitario en el cobre (disminución de la ley, aumento de la dureza, aumento de la relación estéril/mineral, y extensión de yacimientos), las mayores opciones de reducción de huella de carbono se

encuentran en las disminuciones de los factores de emisión de las matrices eléctricas, las cuales están hoy fuera del control de la Industria del Cobre.

Las opciones de reducción de emisiones de GEI de manejo directo por parte de la Industria del Cobre tienen una incidencia menor y están ligados a cambios en las tecnologías y políticas de operación mejorando la eficiencia energética, tema que no es abordado ni analizado dentro de esta Tesis.

Exista la necesidad de precisar parámetros en las metodologías de emisión de GEI (factores de emisión de las matrices eléctricas, definición clara de “Servicios”, y límites de los sistemas de análisis). Según lo señalado por Sara Pimentel (Analista Dirección de Estudios COCHILCO), los factores de emisión de COCHILCO son los que aplican la mayoría de las empresas mineras en sus cálculos. Desde hace bastante tiempo existen conversaciones entre COCHILCO, el Ministerio de Energía y la Mesa Minera de Eficiencia Energética para consensuar una metodología y que sea un organismo (probablemente MINENERGIA) el que publique un valor único para cada sistema interconectado, de manera que todas las actividades productivas del país hagan sus inventarios de emisiones o Huellas de Carbono utilizando un valor único para el sistema de generación del cual se abastezcan.

Se obtuvo en este trabajo que el proceso de Tostación del concentrado de molibdeno emitió 1,1 tCO<sub>2</sub>e/TMF Mo como promedio dentro del período 2006-2009 en la Empresa. La huella de carbono del óxido de molibdeno fue en promedio para el mismo período de 3,5 tCO<sub>2</sub>e/TMF Mo dentro de Codelco, considerando el criterio de asignación por masa para el concentrado de molibdeno. Esto significa una diferencia de 7,5 tCO<sub>2</sub>e/TMF Mo en relación a la media mundial de 11 tCO<sub>2</sub>e/TMF Mo correspondiente al año 2005. De este modo se presentan oportunidades interesantes para la Empresa al producir el molibdeno como co-producto en cuanto a posibles obtenciones de créditos a futuro. Si Codelco produjo el 2005 8.971 TMF Mo de óxido de molibdeno, hubiese significado a

nivel de Empresa una cantidad de 66.854 tCO<sub>2</sub>e como créditos en términos de emisiones para ese año.

Otro de los cálculos obtenidos en este trabajo fue haber desagregado las emisiones de GEI y el consumo de energía del proceso de hidrometalurgia en sus subprocesos. La electro obtención representó un 79% del consumo energético en la hidrometalurgia de Chuquicamata y un 91% del consumo energético en la hidrometalurgia de Radomiro Tomic como promedio para el período 2006-2009, siendo el subproceso más demandante en cuanto a consumo de energía en la hidrometalurgia. Le siguió en importancia, para el mismo período, la lixiviación, con el 18% del consumo energético en la hidrometalurgia de Chuquicamata y un 5% del consumo energética en la de Radomiro Tomic. La extracción por solvente tuvo el menor consumo energético, con el 3% del consumo energético en la hidrometalurgia de Chuquicamata, y el 4% en la de Radomiro Tomic.

## BIBLIOGRAFÍA

British Standards (2010). *PAS 2050:2008. Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services*. Recuperado de Eco Smes: <http://www.ecosmes.net/cm/web/jsp/utils/docsView.jsp?d=85&l=ES>

CAIT (2010). *Climate Analysis Indicators Tool (CAIT)*. Recuperado de CAIT: <http://cait.wri.org/cait.php?page=sectors>

Codelco (2009). Procesos más limpios para refinar y fundir cobre. *Informe Sustentable, N° 87 Octubre 2009*. Santiago, Chile: Autor.

Codelco (2009). *Área de Negocios: Comercialización de productos*. Recuperado de Codelco: [http://www.codelco.cl/areas\\_negocio/fr\\_comercializacion.html](http://www.codelco.cl/areas_negocio/fr_comercializacion.html)

Codelco (2010). *Proceso productivo*. Recuperado de Codelco: <https://www.codelcoeduca.cl/proceso/exploracion/exploracion.asp>

Colman, T. & Paster, P. (2007). Red, White and “Green”: The Cost of Carbon in the Global Wine Trade. *American Association of Wine Economists Working Paper, 9*.

Comisión Nacional de Energía (2008). *Balances Energéticos Nacionales, años 2000 al 2009*. Recuperado de la CNE: [http://www.cne.cl/cnewww/opencms/06\\_Estadisticas/Balances\\_Energ.html](http://www.cne.cl/cnewww/opencms/06_Estadisticas/Balances_Energ.html)

Comisión Chilena del Cobre (2010). *Consumo de energía y emisiones de gases de efecto invernadero asociadas de la minería del cobre en Chile. Año 2009*. Santiago, Chile: Autor.

Comisión Chilena del Cobre (2010). *Anuario de estadísticas del cobre y otros minerales, 1990-2009*. Santiago, Chile: Autor

Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi (2010). *Medición de la huella de carbono en Collahuasi 2009*. Recuperado de Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi: <http://www.collahuasi.cl/espanol2/huella-carbono/resultados-hc-collahuasi.pdf>

Farías, P. (2008). *Electric demand of the copper mining industry and reduction costs for carbon emissions in the SING*. Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.

International Copper Association (2009). *Copper Information*. Recuperado de ICA: <http://www.copperinfo.com/cproducts/index.html>

International Molybdenum Association (2010). *Molybdenum market information*. Recuperado de IMOA: [http://www.imoa.info/molybdenum/molybdenum\\_market\\_information/molybdenum\\_market\\_information.html](http://www.imoa.info/molybdenum/molybdenum_market_information/molybdenum_market_information.html)

International Organization for Standardization (2010). *ISO 14040: 2006 Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework*. Recuperado de ISO: [http://www.iso.org/iso/catalogue\\_detail?csnumber=37456](http://www.iso.org/iso/catalogue_detail?csnumber=37456)

International Organization for Standardization (2010). *ISO 14064: 2006 Greenhouse gases -- Part 1: Specification with guidance at the organization level for quantification and reporting of greenhouse gas emissions and removals*. Recuperado de ISO: [http://www.iso.org/iso/catalogue\\_detail?csnumber=38381](http://www.iso.org/iso/catalogue_detail?csnumber=38381)

IPCC 1996 (2009). *Revised 1996 IPCC Guidelines*. Recuperado de IPCC: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs1.html>

Kuckshinrichs, Wilhelm, Petra Zapp and Witold-Roger Poganietz. "CO<sub>2</sub> emissions of global metal-industries: The case of copper." *Applied Energy*, 2007: 84: 842-852.

Larroulet, C. (2009). *El Cobre y su Impacto en la Economía Nacional* [Diapositiva]. Santiago, Chile: Instituto Libertad y Desarrollo.

MARINTEK, Econ, Carnegie Mellon & DNV (2000). *Study of Greenhouse Gas Emissions from Ships*. Trondheim, Noruega: Autor.

Norgate, T. & Haque, N. (2009). Energy and greenhouse gas impacts of mining and mineral processing operations. *Journal of Cleaner Production*, 2040 (2009).

Norgate, T., Jahanshahi, S. & Rankin, W.J. (2006). Assessing the environmental impact of metal production processes. *Journal of Cleaner Production*, 15 (2007).

Pimentel, S. (2009). *Consumo de energía y emisiones de gases de efecto invernadero de la minería del cobre en Chile. Año 2008*. Santiago, Chile: Comisión Chilena del Cobre.

Portal Minero (2006). *Manual General de Minería y Metalurgia: minas, concentradoras, refinerías, fundiciones, LIX/SX/EW*. Santiago, Chile: Autor.

Storaker, C. (2010). *Análisis de ciclo de vida y la emisión de gases de efecto invernadero en la Industria del Cobre en Chile*. Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.

World Resources Institute (2010). *The Greenhouse Gas Protocol. Measuring to Manage: A Guide to Designing GHG Accounting and Reporting Programs*. Recuperado de WRI: <http://pdf.wri.org/measuring-to-manage.pdf>

**ANEXOS**

## A. EMISIONES DE GEI DE LOS PRODUCTOS MODELADOS EN GABI

### A.1 Concentrado de Cobre de Chuquicamata

Tabla A-1: Emisiones unitarias de CO<sub>2</sub>e en el Concentrado de Cobre de Chuquicamata, en kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu, año 2005 <sup>112</sup>

PROCESO / FUENTE	Electricidad	Combustibles	Insumos	TOTAL
Extracción	103	452	45	599
Concentración	911	7	426	1.344
Servicios	516	88	1	605
<b>TOTAL</b>	<b>1.529</b>	<b>546</b>	<b>472</b>	<b>2.548</b>

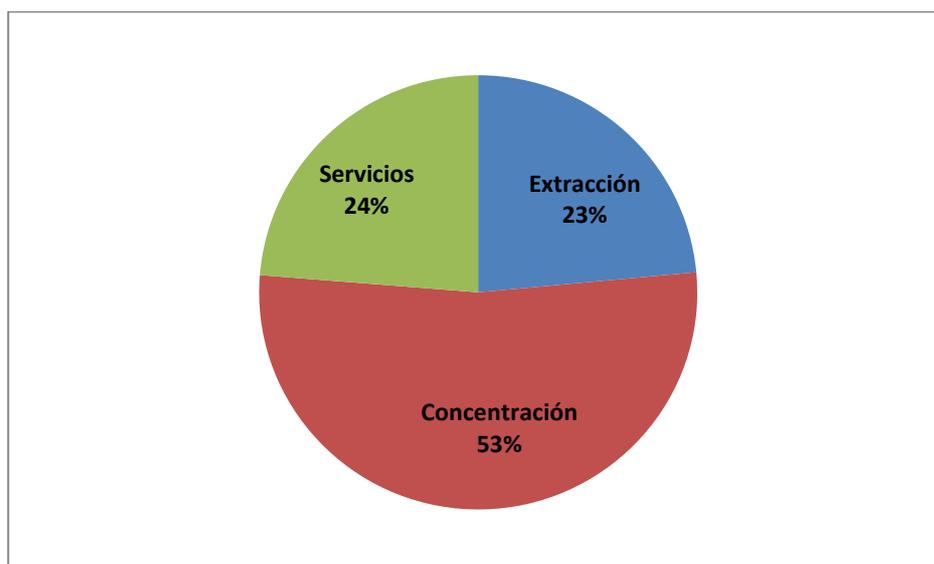


Figura A-1: Participación porcentual de los procesos en la emisión de CO<sub>2</sub>e del Concentrado de Cobre de Chuquicamata, año 2005 <sup>113</sup>

<sup>112</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco.

<sup>113</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco.

## A.2 Cátodo ER de Chuquicamata

Tabla A-2: Emisiones unitarias de CO<sub>2</sub>e en el Cátodo ER de Chuquicamata, en kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu, año 2005 <sup>114</sup>

PROCESO / FUENTE	Electricidad	Combustibles	Insumos	TOTAL
Extracción	108	475	47	630
Concentración	945	7	449	1.401
Fundición	466	340	85	891
Planta de Ácido	280	1	24	304
Electro Refinería	918	52	1	971
Servicios	599	102	1	703
<b>TOTAL</b>	<b>3.316</b>	<b>977</b>	<b>607</b>	<b>4.900</b>

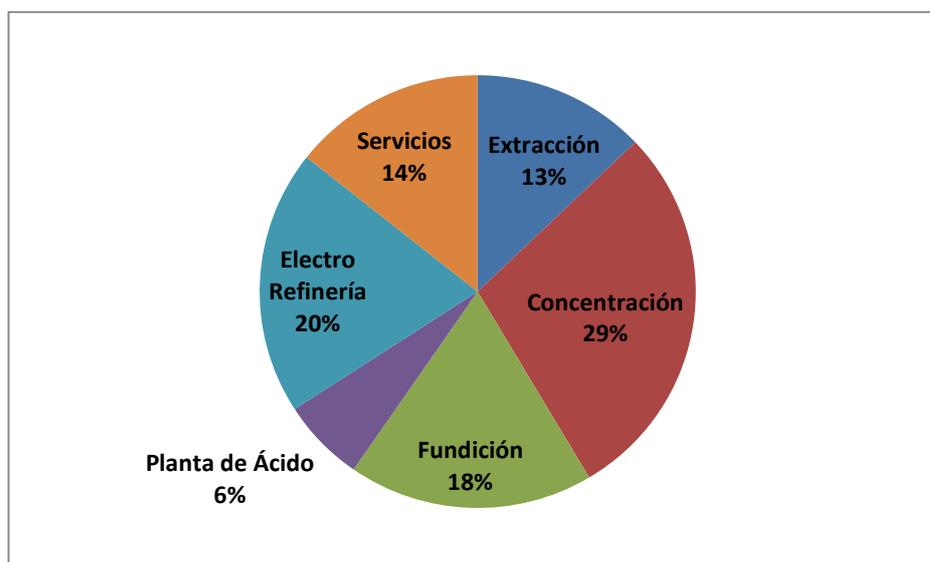


Figura A-2: Participación porcentual de los procesos en la emisión de CO<sub>2</sub>e del Cátodo ER de Chuquicamata, año 2005 <sup>115</sup>

<sup>114</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco.

<sup>115</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco.

### A.3 Cátodo EO de Chuquicamata

Tabla A-3: Emisiones unitarias de CO<sub>2</sub>e en el Cátodo EO de Chuquicamata, en kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu, año 2005 <sup>116</sup>

PROCESO / FUENTE	Electricidad	Combustibles	Insumos	TOTAL
Extracción	186	399	45	631
Hidrometalurgia	2.246	126	33	2.405
Servicios	599	100	1	700
<b>TOTAL</b>	<b>3.031</b>	<b>625</b>	<b>79</b>	<b>3.736</b>

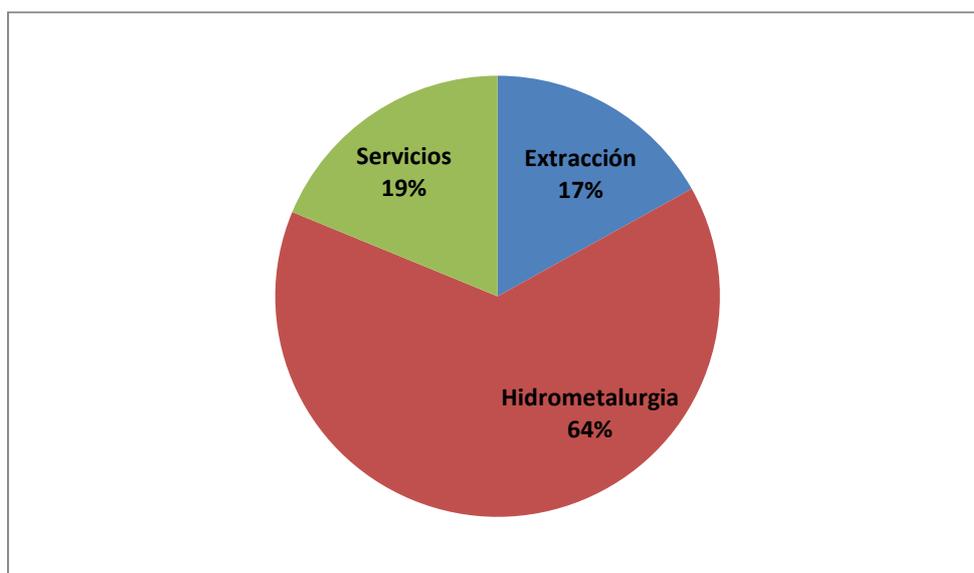


Figura A-3: Participación porcentual de los procesos en la emisión de CO<sub>2</sub>e del Cátodo EO de Chuquicamata, año 2005 <sup>117</sup>

<sup>116</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco.

<sup>117</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco.

#### A.4 Cátodo EO de Radomiro Tomic

Tabla A-4: Emisiones unitarias de CO<sub>2</sub>e en el Cátodo EO de Radomiro Tomic, en kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu, año 2005 <sup>118</sup>

PROCESO / FUENTE	Electricidad	Combustibles	Insumos	TOTAL
Extracción	431	623	86	1.139
Hidrometalurgia	2.053	162	14	2.228
Servicios	451	77	1	529
<b>TOTAL</b>	<b>2.935</b>	<b>861</b>	<b>101</b>	<b>3.897</b>

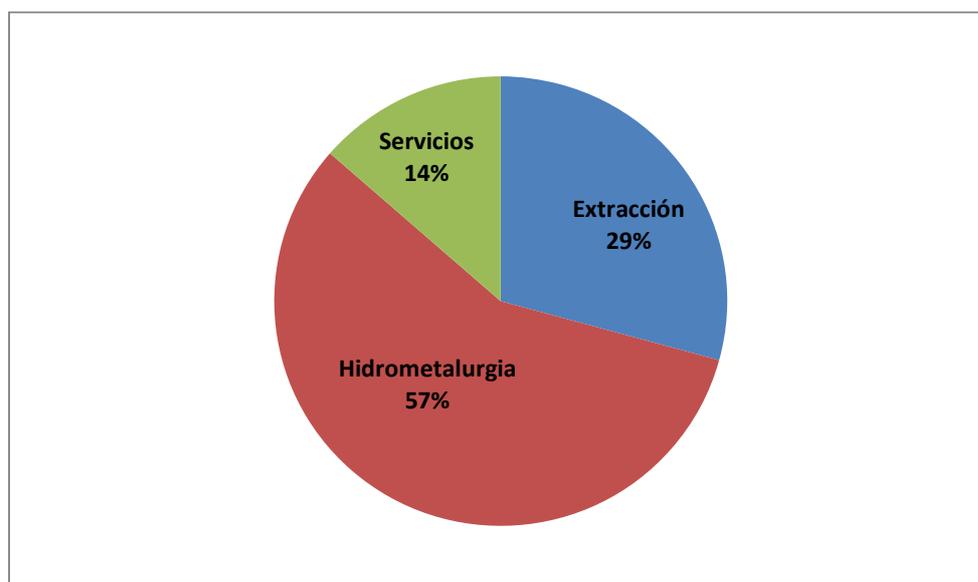


Figura A-4: Participación porcentual de los procesos en la emisión de CO<sub>2</sub>e del Cátodo EO de Radomiro Tomic, año 2005 <sup>119</sup>

<sup>118</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco.

<sup>119</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco.

## A.5 Concentrado de Cobre de Salvador

Tabla A-5: Emisiones unitarias de CO<sub>2</sub>e en el Concentrado de Cobre de Salvador, en kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu, año 2005 <sup>120</sup>

PROCESO / FUENTE	Electricidad	Combustibles	Insumos	TOTAL
<b>Extracción</b>	264	123	53	<b>440</b>
<b>Concentración</b>	972	3	397	<b>1.371</b>
<b>Servicios</b>	420	285	0	<b>705</b>
<b>TOTAL</b>	<b>1.656</b>	<b>410</b>	<b>450</b>	<b>2.516</b>

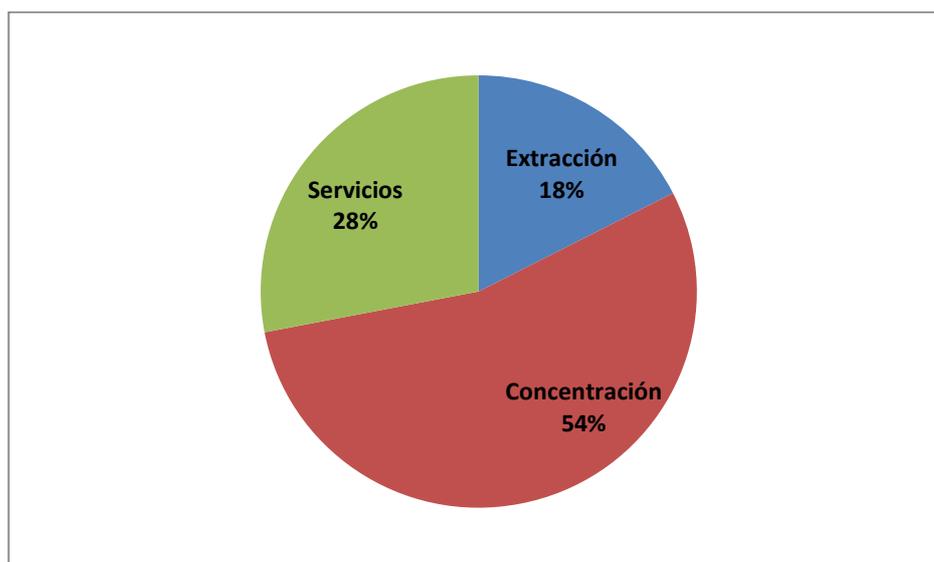


Figura A-5: Participación porcentual de los procesos en la emisión de CO<sub>2</sub>e del Concentrado de Cobre de Salvador, año 2005 <sup>121</sup>

<sup>120</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco.

<sup>121</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco.

## A.6 Cátodo ER de Salvador

Tabla A-6: Emisiones unitarias de CO<sub>2</sub>e en el Cátodo ER de Salvador, en kg CO<sub>2</sub>e/TMF

Cu, año 2005. Criterio 1 <sup>122</sup> <sup>123</sup>

PROCESO / FUENTE	Electricidad	Combustibles	Insumos	TOTAL
<b>Extracción</b>	130	60	26	<b>217</b>
<b>Concentración</b>	1.145	230	427	<b>1.802</b>
<b>Fundición</b>	53	393	39	<b>484</b>
<b>Planta de Ácido</b>	88	3	40	<b>131</b>
<b>Electro Refinería</b>	80	136	0	<b>216</b>
<b>Servicios</b>	244	166	0	<b>410</b>
<b>TOTAL</b>	<b>1.739</b>	<b>987</b>	<b>533</b>	<b>3.260</b>

Tabla A-7: Emisiones unitarias de CO<sub>2</sub>e en el Cátodo ER de Salvador, en kg CO<sub>2</sub>e/TMF

Cu, año 2005. Criterio 2 <sup>124</sup> <sup>125</sup>

PROCESO / FUENTE	Electricidad	Combustibles	Insumos	TOTAL
<b>Extracción</b>	189	247	52	<b>488</b>
<b>Concentración</b>	917	12	400	<b>1.329</b>
<b>Fundición</b>	53	393	39	<b>484</b>
<b>Planta de Ácido</b>	88	3	40	<b>131</b>
<b>Electro Refinería</b>	80	136	0	<b>216</b>
<b>Servicios</b>	413	197	1	<b>611</b>
<b>TOTAL</b>	<b>1.739</b>	<b>987</b>	<b>533</b>	<b>3.260</b>

<sup>122</sup> El Criterio 1 considera todos los procesos de producción de los concentrados de cobre provenientes de Chuquicamata y Andina utilizados para la producción de Cátodo ER de Salvador, como parte del proceso Concentración para la producción de Cátodo ER de Salvador. En este proceso también se ha sumado el proceso de Concentración del Concentrado de Cobre de Salvador utilizado para la producción de Cátodo ER de Salvador. Para el proceso de Extracción de Cátodo ER de Salvador, se ha considerado por lo tanto solamente a la Extracción propia del Concentrado de Cobre de Salvador utilizado para la producción de Cátodo ER de Salvador.

<sup>123</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco.

<sup>124</sup> El Criterio 2 distribuye los procesos de la producción de los concentrados de cobre provenientes de Chuquicamata y Andina utilizados para la producción de Cátodo ER de Salvador. Los procesos de Extracción de cada uno de ellos son sumados a la Extracción del Concentrado de Cobre de Salvador, conformando el proceso de Extracción para Cátodo ER de Salvador. Del mismo modo, los procesos de Concentración de estos concentrados son sumados al proceso de Concentración del Concentrado de Cobre de Salvador, conformando el proceso de Concentración de Cátodo ER de Salvador. Por último, los procesos de Servicios de estos concentrados son sumados al proceso de Servicios propio de Salvador, conformando el proceso de Servicios de Cátodo ER de Salvador.

<sup>125</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco.

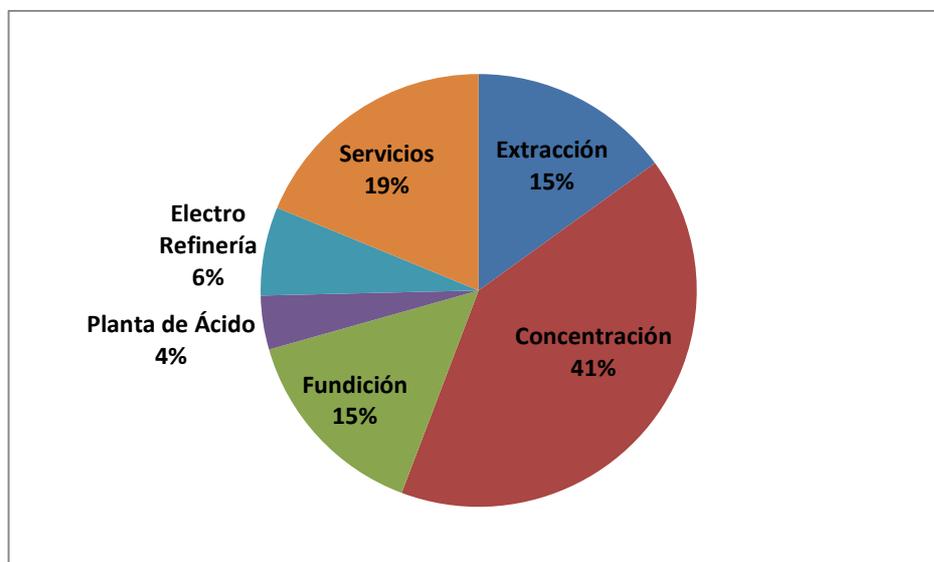


Figura A-6: Participación porcentual de los procesos en la emisión de CO<sub>2</sub>e del Cátodo ER de Salvador, año 2005. Criterio 2 <sup>126</sup>

---

<sup>126</sup> El Criterio 2 distribuye los procesos de la producción de los concentrados de cobre provenientes de Chuquicamata y Andina utilizados para la producción de Cátodo ER de Salvador. Los procesos de Extracción de cada uno de ellos son sumados a la Extracción del Concentrado de Cobre de Salvador, conformando el proceso de Extracción para Cátodo ER de Salvador. Del mismo modo, los procesos de Concentración de estos concentrados son sumados al proceso de Concentración del Concentrado de Cobre de Salvador, conformando el proceso de Concentración de Cátodo ER de Salvador. Por último, los procesos de Servicios de estos concentrados son sumados al proceso de Servicios propio de Salvador, conformando el proceso de Servicios de Cátodo ER de Salvador.

## A.7 Cátodo EO de Salvador

Tabla A-8: Emisiones unitarias de CO<sub>2</sub>e en el Cátodo EO de Salvador, en kg CO<sub>2</sub>e/TMF  
Cu, año 2005 <sup>127</sup>

PROCESO / FUENTE	Electricidad	Combustibles	Insumos	TOTAL
Extracción	0	299	129	427
Hidrometalurgia	935	189	4	1.128
Servicios	363	247	0	610
<b>TOTAL</b>	<b>1.298</b>	<b>735</b>	<b>134</b>	<b>2.166</b>

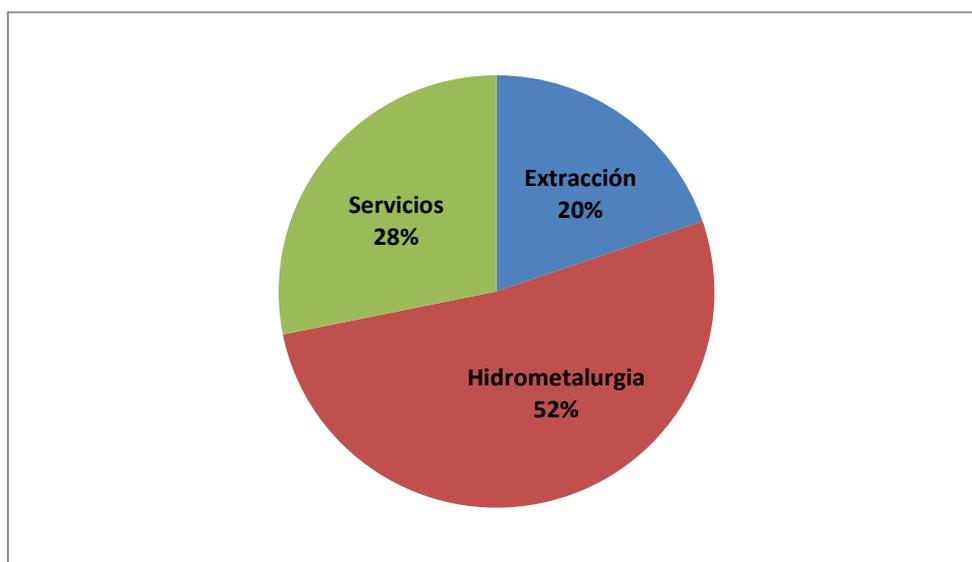


Figura A-7: Participación porcentual de los procesos en la emisión de CO<sub>2</sub>e del Cátodo EO de Salvador, año 2005 <sup>128</sup>

<sup>127</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco.

<sup>128</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco.

## A.8 Concentrado de Cobre en Andina

Tabla A-9: Emisiones unitarias de CO<sub>2</sub>e en el Concentrado de Cobre de Andina, en kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu, año 2005 <sup>129</sup>

PROCESO / FUENTE	Electricidad	Combustibles	Insumos	TOTAL
Extracción	112	176	49	337
Concentración	625	37	293	954
Servicios	7	11	3	21
<b>TOTAL</b>	<b>744</b>	<b>224</b>	<b>345</b>	<b>1.313</b>

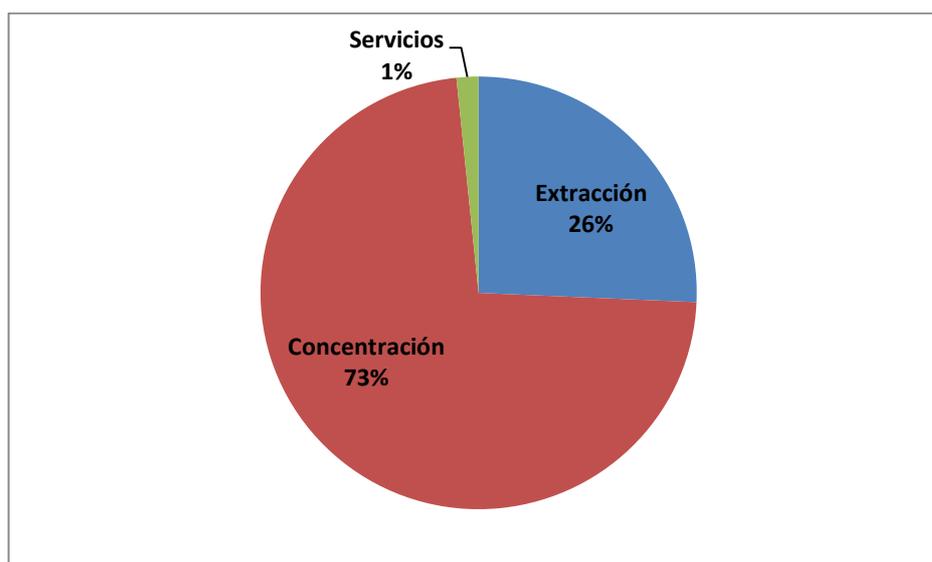


Figura A-8: Participación porcentual de los procesos en la emisión de CO<sub>2</sub>e del Concentrado de Cobre de Andina, año 2005 <sup>130</sup>

<sup>129</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco.

<sup>130</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco.

### A.9 Concentrado de Cobre de El Teniente

Tabla A-10: Emisiones unitarias de CO<sub>2</sub>e en el Concentrado de Cobre de El Teniente, en kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu, año 2005 <sup>131</sup>

PROCESO / FUENTE	Electricidad	Combustibles	Insumos	TOTAL
Extracción	146	54	67	268
Concentración	790	35	170	995
Servicios	19	17	0	37
<b>TOTAL</b>	<b>955</b>	<b>106</b>	<b>237</b>	<b>1.299</b>

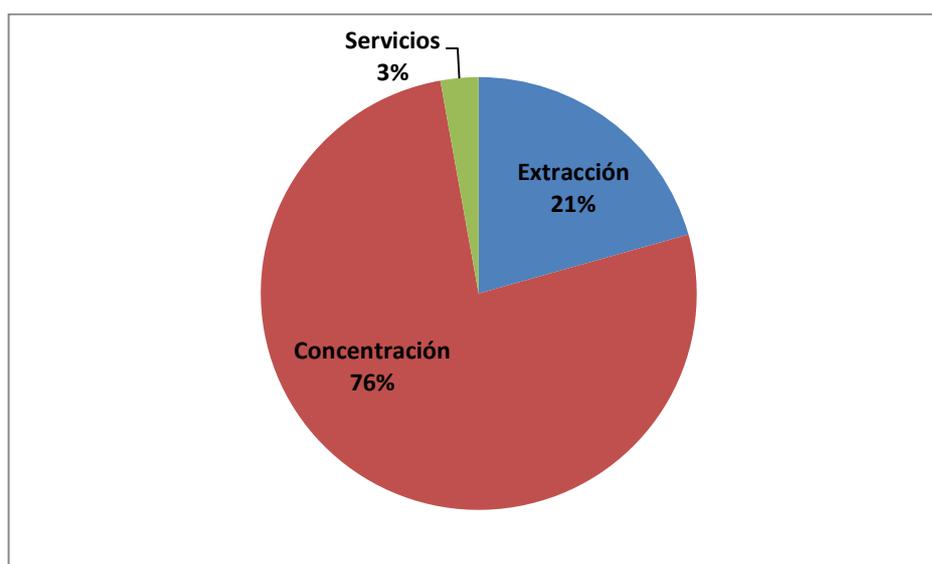


Figura A-9: Participación porcentual de los procesos en la emisión de CO<sub>2</sub>e del Concentrado de Cobre de El Teniente, año 2005 <sup>132</sup>

<sup>131</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco.

<sup>132</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco.

### A.10 Cátodo ER de El Teniente/Ventanas

Tabla A-11: Emisiones unitarias de CO<sub>2</sub>e en el Cátodo ER de El Teniente/Ventanas, en kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu, año 2005 <sup>133</sup>

PROCESO / FUENTE	Electricidad	Combustibles	Insumos	TOTAL
Extracción	173	64	80	317
Concentración	937	41	202	1.180
Fundición	134	382	25	541
Planta de Ácido	98	12	43	153
Electro Refinería	127	93	7	228
Servicios	33	30	0	63
<b>TOTAL</b>	<b>1.503</b>	<b>623</b>	<b>357</b>	<b>2.484</b>

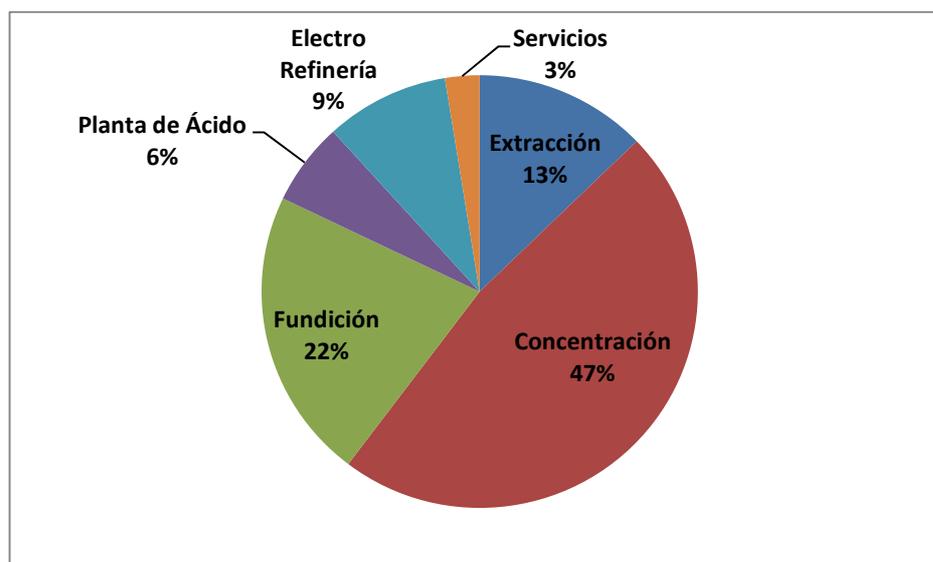


Figura A-10: Participación porcentual de los procesos en la emisión de CO<sub>2</sub>e del Cátodo ER de El Teniente/Ventanas, año 2005 <sup>134</sup>

<sup>133</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco.

<sup>134</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco.

### A.11 RAF de El Teniente

Tabla A-12: Emisiones unitarias de CO<sub>2</sub>e en el RAF de El Teniente, en kg CO<sub>2</sub>e/TMF  
Cu, año 2005 <sup>135</sup>

PROCESO / FUENTE	Electricidad	Combustibles	Insumos	TOTAL
Extracción	173	64	80	317
Concentración	937	41	202	1.180
Fundición	134	382	25	541
Planta de Ácido	98	12	43	153
Servicios	33	30	0	63
<b>TOTAL</b>	<b>1.376</b>	<b>530</b>	<b>350</b>	<b>2.255</b>

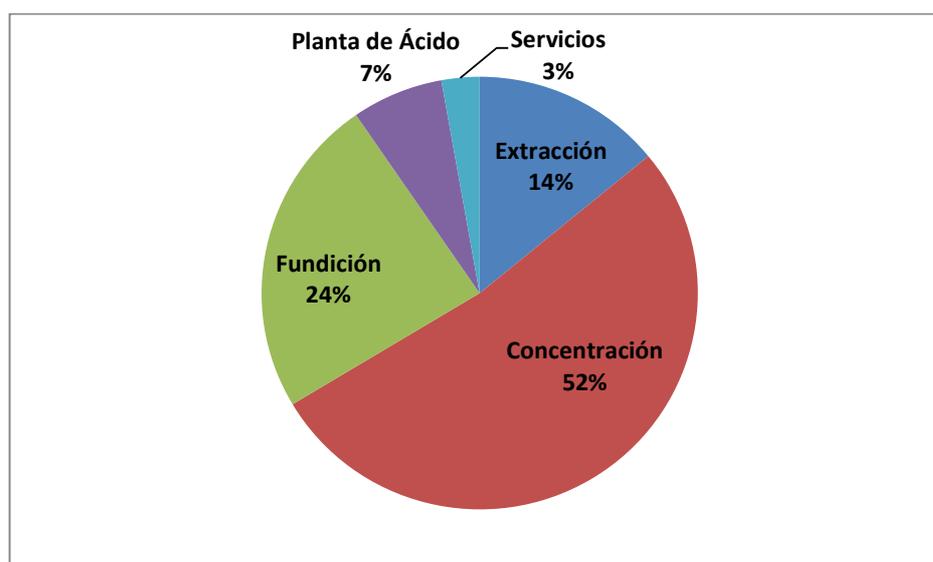


Figura A-11: Participación porcentual de los procesos en la emisión de CO<sub>2</sub>e del RAF de El Teniente, año 2005 <sup>136</sup>

<sup>135</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco.

<sup>136</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco.

## A.12 Factores de emisión de las matrices eléctricas

Tabla A-13: Composición de la matriz SING, período 2000-2009 <sup>137</sup>

FUENTE/AÑO	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Térmica Carbón	56%	29%	37%	28%	37%	36%	50%	58%	58%	57%
Térmica Diesel	2%	1%	0%	0%	1%	0%	1%	19%	29%	23%
Térmica Gas Natural	42%	69%	62%	71%	62%	63%	48%	23%	12%	20%
Hidroelectricidad	1%	1%	1%	1%	1%	0%	1%	0%	0%	0%
Eólica	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
FE tCO <sub>2</sub> e/GWh producida	868	732	766	723	771	762	837	972	1.029	986

Tabla A-14: Composición de la matriz SIC, período 2000-2009 <sup>138</sup>

FUENTE/AÑO	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Térmica Carbón	16%	12%	11%	12%	15%	13%	15%	18%	18%	20%
Térmica Diesel	1%	0%	0%	0%	0%	3%	1%	23%	22%	17%
Térmica Gas Natural	20%	19%	19%	23%	27%	17%	14%	6%	3%	5%
Hidroelectricidad	63%	68%	70%	65%	57%	67%	70%	53%	56%	59%
Eólica	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
FE tCO <sub>2</sub> e/GWh producida	318	262	243	279	338	287	274	499	479	441

<sup>137</sup> Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la CNE y factores de emisión desarrollados por GaBi para Chile según tipos de fuente de electricidad.

<sup>138</sup> Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la CNE y factores de emisión desarrollados por GaBi para Chile según tipos de fuente de electricidad.

### A.13 Contribución según tipo de insumo en las emisiones de GEI en cada producto

Tabla A-15: Emisiones de GEI en la fabricación de insumos utilizados, año 2005 <sup>139</sup>

INSUMOS/PRODUCTO	CONCENTRADO CHUQUI	CÁTODO ER CHUQUI	CÁTODO EO CHUQUI	CÁTODO EO RT	CONCENTRADO SALVADOR	CÁTODO ER SALVADOR	CÁTODO EO SALVADOR	CONCENTRADO ANDINA	CONCENTRADO TENIENTE	CÁTODO ER TENIENTE/ VENTANAS	RAF TENIENTE
UNIDAD	kg CO <sub>2</sub> e/TMF Cu										
Amoniaco (NH <sub>3</sub> )	37,20	39,14	40,31	59,43	0,82	20,75	116,58	36,41	11,29	13,40	13,40
Oxígeno gaseoso (1)	0,00	0,01	0,00			0,00		0,01	0,02	3,41	3,41
Oxígeno gaseoso (2)									0,01	0,01	0,01
Hidrógeno										0,00	
Peróxido de hidrógeno (50%; H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> )						1,72		7,62			
Nitrógeno líquido						0,00		0,00		0,01	
Argón gaseoso										0,00	
Ácido Nítrico (HNO <sub>3</sub> )					2,16	1,06					
Solución de Ácido Clorhídrico						0,01			0,00	0,01	0,01
Propileno glicol (vía hidratación del óxido de propileno) (1)	0,04	0,04	0,01			0,01			0,23	0,28	0,28
Propileno glicol (vía hidratación del óxido de propileno) (2)						0,22	0,18	0,99			
Acetileno (C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> )						0,01		0,06			
Etilenglicol (vía oxidación de metano)						0,05	1,38	0,21			
Hidróxido de sodio (NaOH) (por electrólisis de NaCl con célula de diafragma)										3,01	

<sup>139</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco.

INSUMOS/PRODUCTO	CONCENTR ADO CHUQUI	CÁTOD ER CHUQUI	CÁTOD EO CHUQUI	CÁTOD EO RT	CONCENTR ADO SALVADOR	CÁTOD ER SALVADOR	CÁTOD EO SALVADOR	CONCENTR ADO ANDINA	CONCENTR ADO TENIENTE	CÁTOD ER TENIENTE/ VENTANAS	RAF TENIENTE
UNIDAD	kg CO <sub>2</sub> e/TMF Cu										
Hidróxido de sodio (NaOH) al 100%		0,18	0,19	0,14		0,00			0,01	0,34	0,34
Hidróxido de sodio (NaOH) al 50% (1)		1,21				0,00					
Hidróxido de sodio (NaOH) al 50% (2)										2,04	
Cloruro de sodio (NaCl)						0,79		3,38			
Carbonato de sodio (Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )							0,23				
Arena de sílice (excavación y procesamiento)		8,99	0,01		0,18	13,60				14,04	14,04
Arena de sílice (flour)		70,78				0,00					
Láminas de acero	270,11	285,57	0,31	0,13	404,30	313,82	4,41	79,99	171,90	208,71	206,58
Láminas de acero secundario						12,80		56,66	25,32	30,04	30,04
Madera de pino (12% de humedad)	0,01	0,05	0,27	0,00	5,69	2,91	0,08	0,44	2,00	2,45	2,45
Neumáticos de camión (1)	3,02	3,18	1,56	12,12	7,13	4,50					
Traslado de insumos	4,06	7,28	3,58	2,79	12,31	13,07	4,07	4,76	5,89	11,88	11,62
Concreto	0,36	0,62			16,95	8,99		2,35	14,00	16,62	16,62
Cal (CaO)	154,78	187,51	31,42	22,98	0,65	137,12		147,73	5,15	49,30	49,30
Neumáticos de camión (2)						0,63		2,77	1,10	1,30	1,30
Asignaciones Mina A1	2,43	2,56	0,41			0,79					
Asignaciones Mina A2			0,91			0,00					
Asignaciones Mina A3				3,25							
Asignaciones Mina B1							6,61				
Asignaciones Mina B2					0,06	0,03					
Asignaciones Mina C1						0,45		1,97			
Asignaciones Mina C2						0,02		0,07			
Asignaciones Mina D1									0,46	0,54	0,54
<b>SUMA</b>	<b>472</b>	<b>607</b>	<b>79</b>	<b>101</b>	<b>450</b>	<b>533</b>	<b>134</b>	<b>345</b>	<b>237</b>	<b>357</b>	<b>350</b>

## B. EMISIONES DE GEI DE LOS PROCESOS EN LA EMPRESA

A continuación se muestran los datos utilizados para estimar la emisión promedio de los distintos procesos presentes en la Empresa durante el año 2005.

### B.1 Extracción en Mina Rajo

Se muestra a continuación las emisiones de GEI de las 5 minas rajo de la Empresa modeladas en GaBi, desagregadas según fuente: electricidad, combustibles e insumos. Como se ha señalado, el proceso de Extracción, sea en Mina Rajo o Mina Subterránea, incluye el chancado.

Tabla B-16: Emisiones de GEI en el producto correspondientes a la Extracción en Minas Rajo, en kg CO<sub>2</sub>e por TMF Cu en el producto, año 2005 <sup>140</sup>

<b>MINA RAJO</b>	<b>Emisiones Electricidad</b>	<b>Emisiones Combustible</b>	<b>Emisiones Insumos</b>	<b>Suma Electricidad y Combustible</b>
<b>Chuquicamata</b>	<b>103</b>	452	45	<b>554</b>
<b>Sur (Chuqui) <sup>141</sup></b>	<b>435</b>	831	96	<b>1.266</b>
<b>Radomiro Tomic</b>	<b>431</b>	623	86	<b>1.054</b>
<b>Rajo Salvador</b>	<b>0</b>	299	129	<b>299</b>
<b>Rajo Andina <sup>142</sup></b>	<b>9</b>	427	136	<b>436</b>

<sup>140</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco. En azul se indica las minas alimentada por el SING, y en rojo las minas alimentadas por el SIC.

<sup>141</sup> La Mina Sur (Chuqui) alimenta en un 61,13% de cobre al Cátodo EO de Chuquicamata (dato ingresado en GaBi para el 2005). Se han ajustado los valores asumiendo que el producto tiene un 100% de mineral de origen en ese lugar.

<sup>142</sup> La Mina Rajo de Andina alimenta en un 30,77% de cobre al Concentrado de Cobre de Andina (dato ingresado en GaBi para el 2005). Se han ajustado los valores asumiendo que el producto tiene un 100% de mineral de origen en ese lugar.

El promedio aritmético de la emisión de GEI del proceso Extracción en Mina Rajo es de 722 kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu en el producto<sup>143</sup>.

Para obtener el promedio ponderado de las emisiones del proceso, se utilizan las siguientes cantidades:

Tabla B-2: Masa de cobre de Minas Rajo en productos de la Empresa, en TMF Cu, año 2005<sup>144</sup>

<b>MINA RAJO</b>	<b>Masa de TMF Cu en productos</b>	<b>Detalle de productos considerados</b>
<b>Chuqui</b>	<b>606.919</b>	100% de 556.783 TMF Cu de Conc. de Cobre de Chuqui + 38,87% de 128.985 TMF Cu de Cátodo EO de Chuqui
<b>Sur (Chuqui)</b>	<b>78.849</b>	61,13% de 128.985 TMF Cu de Cátodo EO de Chuquicamata
<b>Radomiro Tomic</b>	<b>288.773</b>	100% de 288.773 TMF Cu de Cátodo EO de RT
<b>Rajo Salvador</b>	<b>26.816</b>	100% de 26.816 TMF Cu de Cátodo EO de Salvador
<b>Rajo Andina</b>	<b>76.351</b>	30,77% de 248.175 TMF Cu de Conc. de Cobre de Andina

**Promedio ponderado de la emisión de GEI del proceso de Extracción en Mina Rajo en la Empresa, año 2005: 725 kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu en el producto<sup>145</sup>.**

<sup>143</sup> Excluye la emisión de los insumos, de manera de hacer el valor comparable a las fuentes bibliográficas.

<sup>144</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco.

<sup>145</sup> Excluye la emisión de los insumos, de manera de hacer el valor comparable a las fuentes bibliográficas.

Algunas fuentes bibliográficas señalan la emisión de la Extracción en Minas Rajo en términos del cobre contenido en el mineral extraído y no en el producto final. Esta comparación tiene mayor sentido ya que de esa manera se aísla los efectos de las recuperaciones de los procesos posteriores. Para poder hacer la comparación con estas fuentes bibliográficas, es necesario ajustar las emisiones a partir de los porcentajes de recuperación del cobre en los distintos procesos hasta llegar al producto final.

Tabla B-3: Emisiones de GEI en el mineral correspondientes a la Extracción en Minas Rajo, año 2005 <sup>146</sup>

<b>MINA RAJO</b>	<b>Suma Electricidad y Combustible [kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu en producto]</b>	<b>% Recuperación Concentración</b>	<b>% Recuperación Hidrometalurgia</b>	<b>Suma Electricidad y Combustible [kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu en mineral]</b>
<b>Chuqui</b>	<b>554</b>	87,54 (roca de Conc. Cu de Chuqui)	76,88 (roca de Cátodo EO de Chuqui)	<b>480</b>
<b>Sur (Chuqui)</b>	<b>1.266</b>		76,88	<b>973</b>
<b>Radomiro Tomic</b>	<b>1.054</b>		81,42	<b>858</b>
<b>Rajo Salvador</b>	<b>299</b>		75,00 <sup>147</sup>	<b>224</b>
<b>Rajo Andina</b>	<b>436</b>	87,67		<b>382</b>

El promedio aritmético de la emisión de GEI del proceso Extracción en Mina Rajo es de 583 kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu en el mineral <sup>148</sup>.

<sup>146</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco. En azul se indica las minas alimentada por el SING, y en rojo las minas alimentadas por el SIC.

<sup>147</sup> Valor asumido.

<sup>148</sup> Excluye la emisión de los insumos, de manera de hacer el valor comparable a las fuentes bibliográficas.

Para obtener el promedio ponderado de las emisiones del proceso, se deben considerar los porcentajes de recuperación de cobre de los productos alimentados por la mina, de manera de considerar la producción de TMF Cu en el mineral chancado.

Tabla B-4: Masa de cobre de Minas Rajo en el mineral extraído, en TMF Cu, año 2005<sup>149</sup>

<b>MINA RAJO</b>	<b>Masa en productos</b>	<b>% Recuperación</b>	<b>Masa en el mineral</b>
<b>Chuqui</b>	606.919	87,54 (91,7% de la roca) y 76,88 (8,3% de la roca)	<b>701.247</b>
<b>Sur (Chuqui)</b>	78.849	76,88	<b>102.561</b>
<b>Radomiro Tomic</b>	288.773	81,42	<b>354.671</b>
<b>Rajo Salvador</b>	26.816	75,00 <sup>150</sup>	<b>35.755</b>
<b>Rajo Andina</b>	76.351	87,67	<b>87.089</b>

**Promedio ponderado de la emisión de GEI del proceso de Extracción en Mina Rajo en la Empresa, año 2005: 610 kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu en el mineral<sup>151</sup>.**

## **B.2 Extracción en Mina Subterránea**

Se muestra a continuación las emisiones de GEI de las 3 minas subterráneas de la Empresa modeladas en GaBi, desagregadas según fuente: electricidad, combustibles e insumos. Como se ha señalado, el proceso de Extracción (sea en Mina Subterránea o

<sup>149</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco.

<sup>150</sup> Valor asumido.

<sup>151</sup> Excluye la emisión de los insumos, de manera de hacer el valor comparable a las fuentes bibliográficas.

Mina Rajo) incluye el chancado. Se muestran las emisiones propias del proceso en 1 TMF Cu en el concentrado proveniente de cada mina. Para ello, en aquellos casos donde las minas solo proveen parte del mineral del concentrado que alimentan, se muestran los valores asumiendo que el producto tiene un 100% a la mina como fuente de mineral.

Tabla B-5: Emisiones de GEI en el concentrado correspondientes a la Extracción en Minas Subterráneas, en kg CO<sub>2</sub>e por TMF Cu en el concentrado, año 2005 <sup>152</sup>

<b>MINA SUBTERRÁNEA</b>	<b>Emisiones Electricidad</b>	<b>Emisiones Combustible</b>	<b>Emisiones Insumos</b>	<b>Suma Electricidad y Combustible</b>
<b>Salvador Subte.</b>	<b>264</b>	123	53	<b>387</b>
<b>Andina Subte.</b> <sup>153</sup>	<b>158</b>	65	11	<b>222</b>
<b>El Teniente</b>	<b>146</b>	54	67	<b>200</b>

El promedio aritmético de la emisión de GEI del proceso Extracción en Mina Subterránea es de 270 kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu en el producto <sup>154</sup>.

Para obtener el promedio ponderado de las emisiones del proceso, se utilizan las siguientes cantidades:

<sup>152</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco. En azul se indica las minas alimentada por el SING, y en rojo las minas alimentadas por el SIC.

<sup>153</sup> La Mina Andina Subterránea alimenta en un 69,24% de cobre al Concentrado de Cobre de Andina (dato ingresado en GaBi para el 2005). Se han ajustado los valores asumiendo que el producto tiene un 100% de mineral de origen en ese lugar.

<sup>154</sup> Excluye la emisión de los insumos, de manera de hacer el valor comparable a las fuentes bibliográficas.

Tabla B-6: Masa de cobre de Minas Subterráneas en Concentrados de Cobre de la Empresa, en TMF Cu, año 2005 <sup>155</sup>

<b>MINA SUBTERRÁNEA</b>	<b>Masa de TMF Cu en productos</b>	<b>Detalle de productos considerados</b>
<b>Salvador Subte.</b>	<b>53.170</b>	100% de 53.170 TMF Cu de Conc. de Cobre de Salvador
<b>Andina Subte.</b>	<b>171.824</b>	69,24% de 248.175 TMF Cu de Co. de Cobre de Andina
<b>El Teniente</b>	<b>442.452</b>	100% de 442.452 TMF Cu de Co. de Cobre de Teniente

**Promedio ponderado de la emisión de GEI del proceso de Extracción en Mina Subterránea en la Empresa, año 2005: 221 kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu en el concentrado<sup>156</sup>.**

Al igual que para el caso de las Minas Rajo, la mayor parte de las fuentes bibliográficas señalan la emisión de la Extracción en Minas Subterráneas en términos del cobre contenido en el mineral extraído y no en el concentrado. Para poder hacer la comparación con estas fuentes bibliográficas, es necesario ajustar las emisiones a partir de los porcentajes de recuperación del cobre en la concentración hasta llegar al concentrado.

<sup>155</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco.

<sup>156</sup> Excluye la emisión de los insumos, de manera de hacer el valor comparable a las fuentes bibliográficas.

Tabla B-7: Emisiones de GEI en el mineral correspondientes a la Extracción en Minas Subterráneas, año 2005 <sup>157</sup>

<b>MINA SUBTERRÁNEA</b>	<b>Suma Electricidad y Combustible [kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu en concentrado]</b>	<b>% Recuperación Concentración</b>	<b>Suma Electricidad y Combustible [kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu en mineral]</b>
<b>Salvador Subte.</b>	<b>387</b>	88,54	<b>343</b>
<b>Andina Subte.</b>	<b>222</b>	87,67	<b>195</b>
<b>El Teniente</b>	<b>200</b>	88,95	<b>178</b>

El promedio aritmético de la emisión de GEI del proceso Extracción en Mina Subterránea es de 239 kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu en el mineral<sup>158</sup>.

Para obtener el promedio ponderado de las emisiones del proceso, se deben considerar los porcentajes de recuperación de cobre en la concentración, de manera de considerar la producción de TMF Cu en el mineral chancado.

Tabla B-8: Masa de cobre de Minas Subterráneas en el mineral extraído, en TMF Cu, año 2005<sup>159</sup>

<b>MINA SUBTERRÁNEA</b>	<b>Masa en productos</b>	<b>% Recuperación</b>	<b>Masa en el mineral</b>
<b>Salvador Subte.</b>	53.170	88,54	<b>60.051</b>
<b>Andina Subte.</b>	171.824	87,67	<b>195.990</b>
<b>El Teniente</b>	442.452	88,95	<b>497.416</b>

<sup>157</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco. En azul se indica las minas alimentada por el SING, y en rojo las minas alimentadas por el SIC.

<sup>158</sup> Excluye la emisión de los insumos, de manera de hacer el valor comparable a las fuentes bibliográficas.

<sup>159</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco.

**Promedio ponderado de la emisión de GEI del proceso de Extracción en Mina Subterránea en la Empresa, año 2005: 196 kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu en el mineral<sup>160</sup>.**

### B.3 Concentración

Se muestra a continuación las emisiones de GEI de las 4 plantas de concentración de la Empresa modeladas en GaBi, desagregadas según fuente: electricidad, combustibles e insumos. Como se ha señalado, el proceso de Concentración incluye la molienda. Se muestran las emisiones propias del proceso en 1 TMF Cu en Concentrado de Cobre proveniente de cada planta de concentración.

Tabla B-9: Emisiones de GEI en el Concentrado de Cobre correspondientes al proceso de Concentración, en kg CO<sub>2</sub>e por TMF Cu en el Concentrado de Cobre, año 2005 <sup>161</sup>

PLANTA DE CONCENTRACIÓN	Emisiones Electricidad	Emisiones Combustible	Emisiones Insumos	Suma Electricidad y Combustible
Chuquicamata	911	7	426	918
Salvador	972	3	397	974
Andina	625	37	293	662
El Teniente	790	35	170	825

El promedio aritmético de la emisión de GEI del proceso de Concentración es de 845 kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu en el Concentrado de Cobre<sup>162</sup>.

<sup>160</sup> Excluye la emisión de los insumos, de manera de hacer el valor comparable a las fuentes bibliográficas.

<sup>161</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco. En azul se indica los procesos alimentados por el SING, y en rojo los procesos alimentados por el SIC.

Para obtener el promedio ponderado de las emisiones del proceso, se utilizan las siguientes cantidades:

Tabla B-10: Masa de cobre en Concentrados de Cobre de la Empresa, en TMF Cu, año 2005 <sup>163</sup>

<b>PLANTA DE CONCENTRACIÓN</b>	<b>Masa en concentrados</b>
<b>Chuquicamata</b>	556.783
<b>Salvador</b>	53.170
<b>Andina</b>	248.175
<b>El Teniente</b>	442.452

**Promedio ponderado de la emisión de GEI del proceso de Concentración en la Empresa, año 2005:** 894 kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu en el concentrado<sup>164</sup>.

#### **B.4 Hidrometalurgia**

Se muestra a continuación las emisiones de GEI de las 3 plantas de hidrometalurgia de la Empresa modeladas en GaBi, desagregadas según fuente: electricidad, combustibles e insumos. Se muestran las emisiones propias del proceso en 1 TMF Cu en el Cátodo EO proveniente de cada planta de hidrometalurgia.

---

<sup>162</sup> Excluye la emisión de los insumos, de manera de hacer el valor comparable a las fuentes bibliográficas.

<sup>163</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco.

<sup>164</sup> Excluye la emisión de los insumos, de manera de hacer el valor comparable a las fuentes bibliográficas.

Tabla B-11: Emisiones de GEI en el Cátodo EO correspondientes al proceso de Hidrometalurgia, en kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu en el Cátodo EO, año 2005 <sup>165</sup>

HIDROMETALURGIA	Emisiones Electricidad	Emisiones Combustible	Emisiones Insumos	Suma Electricidad y Combustible
<b>Chuquicamata</b>	<b>2.246</b>	126	33	<b>2.372</b>
<b>Radomiro Tomic</b>	<b>2.053</b>	162	14	<b>2.214</b>
<b>Salvador</b>	<b>935</b>	189	4	<b>1.124</b>

El promedio aritmético de la emisión de GEI del proceso de Hidrometalurgia es de 1.903 kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu en el Cátodo EO<sup>166</sup>.

Para obtener el promedio ponderado de las emisiones del proceso, se utilizan las siguientes cantidades:

Tabla B-12: Masa de cobre en Cátodos EO de la Empresa, en TMF Cu, año 2005 <sup>167</sup>

PLANTA DE HIDROMETALURGIA	Masa en Cátodos EO
<b>Chuquicamata</b>	128.985
<b>Radomiro Tomic</b>	288.773
<b>Salvador</b>	26.816

<sup>165</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco. En azul se indica los procesos alimentados por el SING, y en rojo los procesos alimentados por el SIC.

<sup>166</sup> Excluye la emisión de los insumos, de manera de hacer el valor comparable a las fuentes bibliográficas.

<sup>167</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco.

**Promedio ponderado de la emisión de GEI del proceso de Hidrometalurgia en la Empresa, año 2005: 2.194 kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu en el Cátodo EO<sup>168</sup>.**

## B.5 Fundición

Las fuentes bibliográficas agrupan a la Planta de Ácido como parte de la Fundición. De manera de hacer comparables los valores, se muestra a continuación las emisiones de GEI de las 3 fundiciones de la Empresa modeladas en GaBi sumadas con sus respectivas Plantas de Ácido también modeladas en el programa. Estos valores se muestran desagregados según fuente: electricidad, combustibles e insumos. Se muestran las emisiones propias del proceso en 1 TMF Cu en el Cátodo ER proveniente de cada Fundición con su respectiva Planta de Ácido.

Tabla B-13: Emisiones de GEI en el Ánodo correspondientes al proceso de Fundición y Planta de Ácido, en kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu en el Ánodo, año 2005 <sup>169</sup>

FUNDICIÓN Y PLANTA DE ÁCIDO	Emisiones Electricidad	Emisiones Combustible	Emisiones Insumos	Suma Electricidad y Combustible
Chuquicamata	746	341	109	1.087
Potrerillos	140	396	79	536
Caletones	231	394	68	626

<sup>168</sup> Excluye la emisión de los insumos, de manera de hacer el valor comparable a las fuentes bibliográficas.

<sup>169</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco. En azul se indica los procesos alimentados por el SING, y en rojo los procesos alimentados por el SIC.

El promedio aritmético de la emisión de GEI del proceso de Fundición y Planta de Ácido es de 749 kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu en el Cátodo ER<sup>170</sup>.

Para obtener el promedio ponderado de las emisiones del proceso, se utilizan las siguientes cantidades:

Tabla B-14: Masa de cobre en Ánodos de la Empresa, en TMF Cu, año 2005 <sup>171</sup>

FUNDICIÓN	Masa en Ánodos
Chuquicamata	359.457
Potrerosillos	112.526
Caletones	428.928 <sup>172</sup>

**Promedio ponderado de la emisión de GEI del proceso de Fundición y Planta de Ácido en la Empresa, año 2005: 798 kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu en el Cátodo ER<sup>173</sup>.**

## B.6 Electro Refinería

Se muestra a continuación las emisiones de GEI de las 3 Electro Refinerías de la Empresa modeladas en GaBi, desagregadas según fuente: electricidad, combustibles e insumos. Se muestran las emisiones propias del proceso en 1 TMF Cu en el Cátodo ER proveniente de cada Electro Refinería.

<sup>170</sup> Excluye la emisión de los insumos, de manera de hacer el valor comparable a las fuentes bibliográficas.

<sup>171</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco.

<sup>172</sup> Este valor incluye la masa de RAF resultante de la misma fundición.

<sup>173</sup> Excluye la emisión de los insumos, de manera de hacer el valor comparable a las fuentes bibliográficas.

Tabla B-15: Emisiones de GEI en el Cátodo ER correspondientes al proceso de Electro Refinería, en kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu en el Cátodo ER, año 2005 <sup>174</sup>

<b>ELECTRO REFINERÍA</b>	<b>Emisiones Electricidad</b>	<b>Emisiones Combustible</b>	<b>Emisiones Insumos</b>	<b>Suma Electricidad y Combustible</b>
<b>Chuquicamata</b>	<b>232</b>	52	1	<b>284</b>
<b>Potrerosillos</b>	<b>80</b>	136	0	<b>216</b>
<b>Ventanas</b>	<b>127</b>	93	7	<b>221</b>

El promedio aritmético de la emisión de GEI del proceso de Electro Refinería es de 240 kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu en el Cátodo ER<sup>175</sup>.

Para obtener el promedio ponderado de las emisiones del proceso, se utilizan las siguientes cantidades:

Tabla B-16: Masa de cobre en Cátodos ER de la Empresa, en TMF Cu, año 2005 <sup>176</sup>

<b>ELECTRO REFINERÍA</b>	<b>Masa en Cátodos ER</b>
<b>Chuquicamata</b>	359.457
<b>Potrerosillos</b>	112.526
<b>Ventanas</b>	196.717

<sup>174</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco. En azul se indica los procesos alimentados por el SING, y en rojo los procesos alimentados por el SIC.

<sup>175</sup> Excluye la emisión de los insumos, de manera de hacer el valor comparable a las fuentes bibliográficas.

<sup>176</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco.

**Promedio ponderado de la emisión de GEI del proceso de Electro Refinería, año 2005:** 254 kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu en el Cátodo ER<sup>177</sup>.

## **B.7 Servicios**

Los Servicios no constituyen un proceso propiamente tal, sino que un conjunto de acciones desagregadas por parte de la Empresa de carácter administrativo, de personal, gerencia, recursos humanos, entre otros. La unidad de la Empresa que realizó los modelos para GaBi dispuso de los consumos por centros de costo entregados por cada división. Estos centros de costo muchas veces aplican a variados procesos, donde no es posible hacer una asignación clara a cada uno de ellos, o bien determinar aquellos consumos que son Servicios. Es por esta razón que los consumos energéticos, y por ende las emisiones, son tan dispares entre un producto y otro, dada la ambigua definición de lo que es parte de los Servicios o no.

Se muestra a continuación las emisiones de GEI de los 9 productos de la Empresa modelados en GaBi que tienen una cantidad de venta final distinta de cero, desagregadas según fuente: electricidad, combustibles e insumos. Se muestran las emisiones propias del proceso en 1 TMF Cu en el producto proveniente de los Servicios asignados.

---

<sup>177</sup> Excluye la emisión de los insumos, de manera de hacer el valor comparable a las fuentes bibliográficas.

Tabla B-17: Emisiones de GEI en el producto correspondientes al proceso de Servicios, en kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu en el producto, año 2005 <sup>178</sup>

SERVICIOS	Emisiones Electricidad	Emisiones Combustible	Emisiones Insumos	Suma Electricidad y Combustible
Concentrado Chuqui	516	88	1	604
Cátodo ER Chuqui	599	102	1	701
Cátodo EO Chuqui	599	100	1	699
Cátodo EO RT	451	77	1	528
Cátodo ER Salvador	244	166	0	409
Cátodo EO Salvador	363	247	0	610
Concentrado Andina	7	11	3	18
Cátodo ER Teniente/Ventanas	33	30	0	63
RAF Teniente <sup>179</sup>	33	30	0	63

El promedio aritmético de la emisión de GEI del proceso de Servicios es de 411 kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu en el producto<sup>180</sup>.

Para obtener el promedio ponderado de las emisiones del proceso, se utilizan las siguientes cantidades:

<sup>178</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco. En azul se indica los procesos alimentados por el SING, y en rojo los procesos alimentados por el SIC.

<sup>179</sup> Para el RAF de El Teniente, ante la ausencia de datos, se supuso los mismos servicios aplicados para el Cátodo ER de El Teniente/Ventanas.

<sup>180</sup> Excluye la emisión de los insumos, de manera de hacer el valor comparable a las fuentes bibliográficas.

Tabla B-18: Masa de cobre en productos de venta final de la Empresa, en TMF Cu, año 2005 <sup>181</sup>

<b>SERVICIOS</b>	<b>Masa en productos</b>
Concentrado de Cobre Chuquicamata	139.530
Cátodo ER de Chuquicamata	359.457
Cátodo EO de Chuquicamata	128.985
Cátodo EO de Radomiro Tomic	288.773
Cátodo ER de Salvador	112.526
Cátodo EO de Salvador	26.816
Concentrado de Cobre de Andina	222.745
Cátodo ER de El Teniente/Ventanas	196.717
RAF de El Teniente	232.211

**Promedio ponderado de la emisión de GEI del proceso de Servicios, año 2005: 394 kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu en el producto <sup>182</sup>.**

<sup>181</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco.

<sup>182</sup> Excluye la emisión de los insumos, de manera de hacer el valor comparable a las fuentes bibliográficas.

## C. CONSUMO DE ENERGÍA DE LOS PRODUCTOS MODELADOS EN GABI

### C.1 Concentrado de Cobre de Chuquicamata

Tabla C-1: Consumos unitarios de energía en el Concentrado de Cobre de Chuquicamata, en MJ/TMF Cu, año 2005<sup>183</sup>

PROCESO / FUENTE	Electricidad	Combustibles	Insumos	TOTAL
<b>Extracción</b>	455	6.555	549	<b>7.559</b>
<b>Concentración</b>	4.042	182	3.228	<b>7.452</b>
<b>Servicios</b>	2.288	1.402	0	<b>3.690</b>
<b>TOTAL</b>	<b>6.786</b>	<b>8.139</b>	<b>3.777</b>	<b>18.701</b>

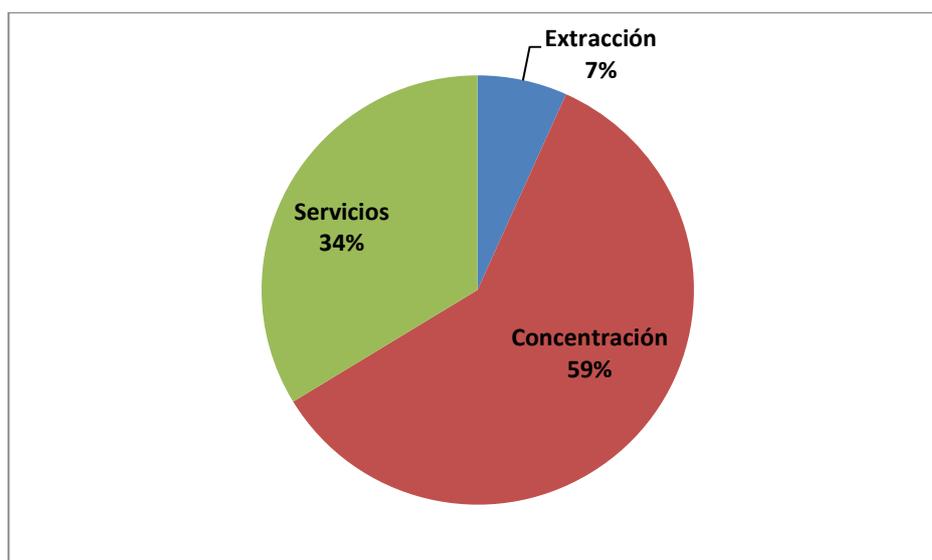


Figura C-1: Participación porcentual de los procesos en el consumo de energía eléctrica del Concentrado de Cobre de Chuquicamata, año 2005<sup>184</sup>

<sup>183</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco.

<sup>184</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco.

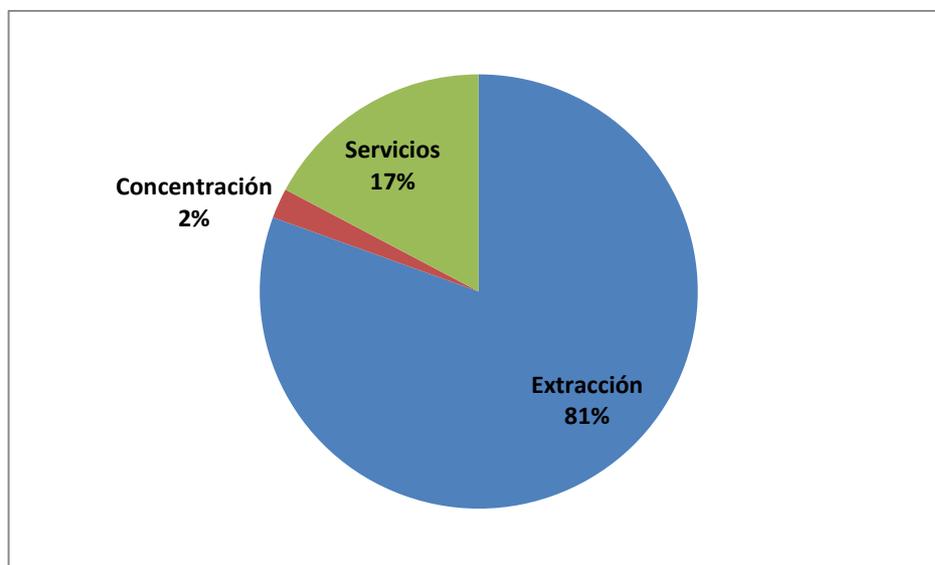


Figura C-2: Participación porcentual de los procesos en el consumo de combustible (en términos de energía) del Concentrado de Cobre de Chuquicamata, año 2005<sup>185</sup>

## C.2 Cátodo ER de Chuquicamata

Tabla C-2: Consumos unitarios de energía en el Cátodo ER de Chuquicamata, en MJ/TMF Cu, año 2005<sup>186</sup>

PROCESO / FUENTE	Electricidad	Combustibles	Insumos	TOTAL
Extracción	479	6.897	578	<b>7.954</b>
Concentración	4.191	191	3.398	<b>7.781</b>
Fundición	2.068	5.078	1.279	<b>8.425</b>
Planta de Ácido	1.240	9	110	<b>1.360</b>
Electro Refinería	4.075	3.128	8	<b>7.211</b>
Servicios	2.659	1.629	0	<b>4.287</b>
<b>TOTAL</b>	<b>14.712</b>	<b>16.933</b>	<b>5.372</b>	<b>37.017</b>

<sup>185</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco.

<sup>186</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco.

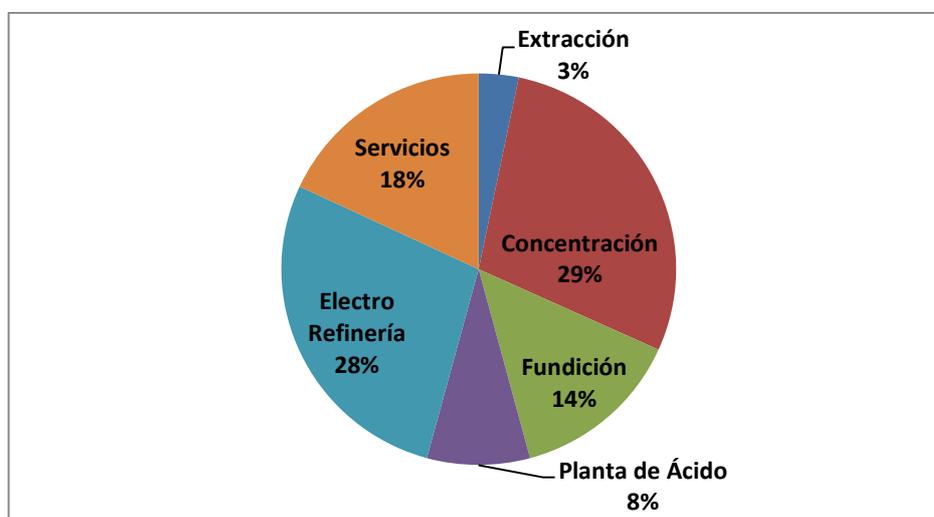


Figura C-3: Participación porcentual de los procesos en el consumo de energía eléctrica del Cátodo ER de Chuquicamata, año 2005<sup>187</sup>

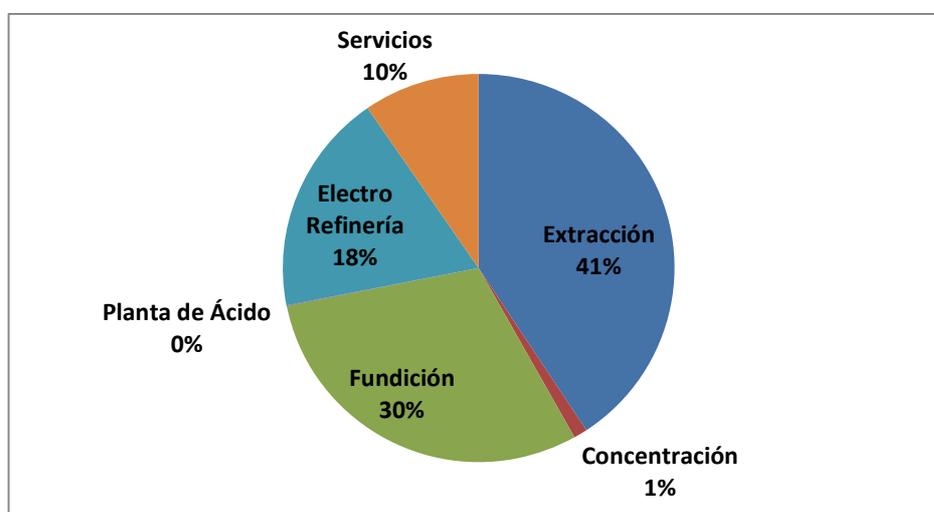


Figura C-4: Participación porcentual de los procesos en el consumo de combustible (en términos de energía) del Cátodo ER de Chuquicamata, año 2005<sup>188</sup>

<sup>187</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco.

<sup>188</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco.

### C.3 Cátodo EO de Chuquicamata

Tabla C-3: Consumos unitarios de energía en el Cátodo EO de Chuquicamata, en MJ/TMF Cu, año 2005<sup>189</sup>

PROCESO / FUENTE	Electricidad	Combustibles	Insumos	TOTAL
Extracción	827	5.668	604	<b>7.099</b>
Hidrometalurgia	9.964	2.603	148	<b>12.715</b>
Servicios	2.660	1.597	0	<b>4.256</b>
<b>TOTAL</b>	<b>13.450</b>	<b>9.867</b>	<b>752</b>	<b>24.070</b>

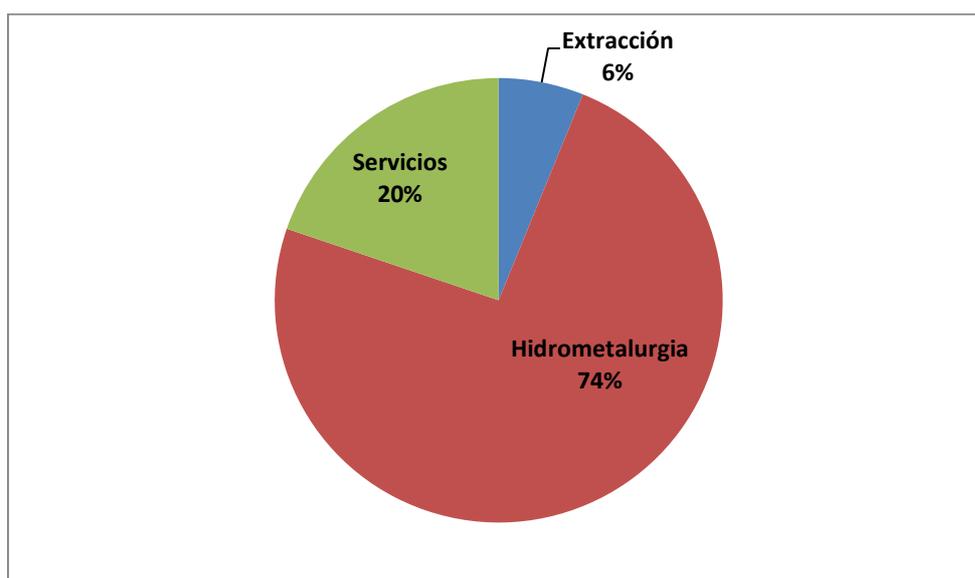


Figura C-5: Participación porcentual de los procesos en el consumo de energía eléctrica del Cátodo EO de Chuquicamata, año 2005<sup>190</sup>

<sup>189</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco.

<sup>190</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco.

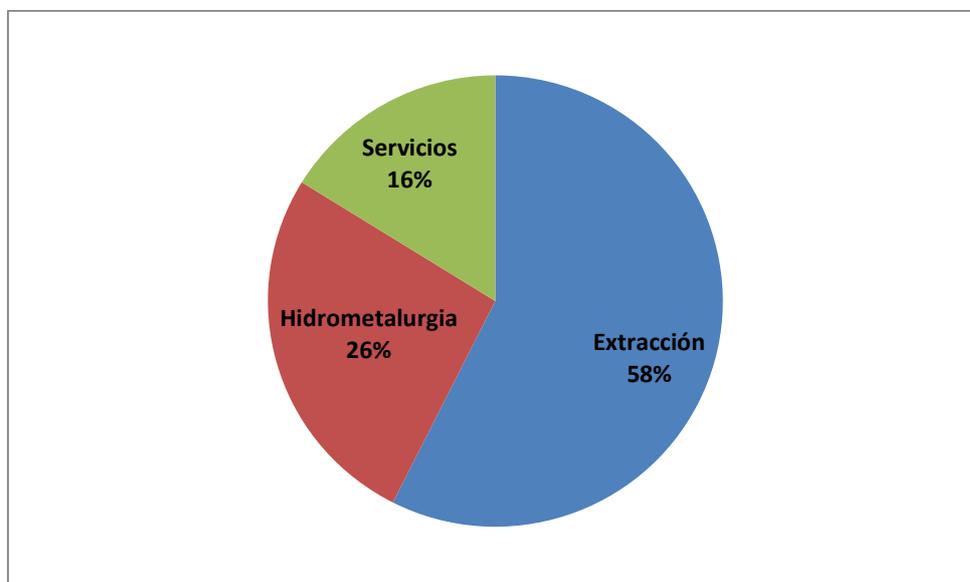


Figura C-6: Participación porcentual de los procesos en el consumo de combustible (en términos de energía) del Cátodo EO de Chuquicamata, año 2005<sup>191</sup>

#### C.4 Cátodo EO de Radomiro Tomic

Tabla C-4: Consumos unitarios de energía en el Cátodo EO de Radomiro Tomic, en MJ/TMF Cu, año 2005<sup>192</sup>

PROCESO / FUENTE	Electricidad	Combustibles	Insumos	TOTAL
Extracción	1.912	8.594	957	<b>11.463</b>
Hidrometalurgia	9.108	2.970	62	<b>12.140</b>
Servicios	2.001	1.226	0	<b>3.227</b>
<b>TOTAL</b>	<b>13.021</b>	<b>12.790</b>	<b>1.019</b>	<b>26.830</b>

<sup>191</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco.

<sup>192</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco.

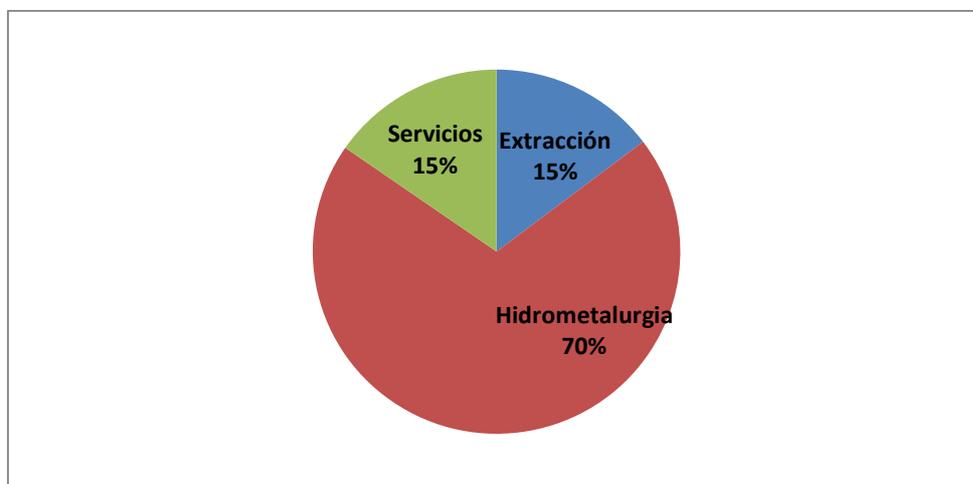


Figura C-7: Participación porcentual de los procesos en el consumo de energía eléctrica del Cátodo EO de Radomiro Tomic, año 2005<sup>193</sup>

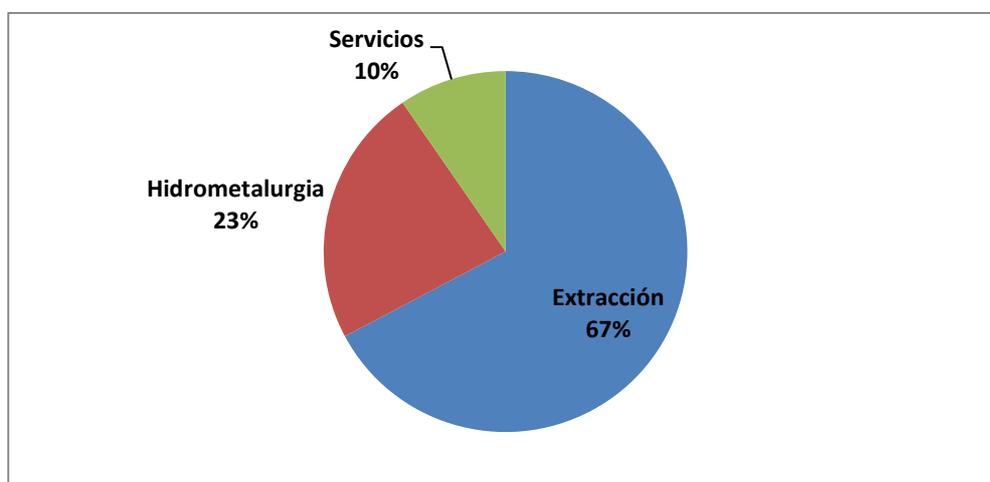


Figura C-8: Participación porcentual de los procesos en el consumo de combustible (en términos de energía) del Cátodo EO de Radomiro Tomic, año 2005<sup>194</sup>

---

<sup>193</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco.

<sup>194</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco.

## C.5 Concentrado de Cobre de Salvador

Tabla C-5: Consumos unitarios de energía en el Concentrado de Cobre de Salvador, en MJ/TMF Cu, año 2005<sup>195</sup>

PROCESO / FUENTE	Electricidad	Combustibles	Insumos	TOTAL
Extracción	3.108	1.866	308	<b>5.282</b>
Concentración	11.434	180	3.612	<b>15.226</b>
Servicios	4.938	3.580	0	<b>8.517</b>
<b>TOTAL</b>	<b>19.479</b>	<b>5.626</b>	<b>3.920</b>	<b>29.025</b>

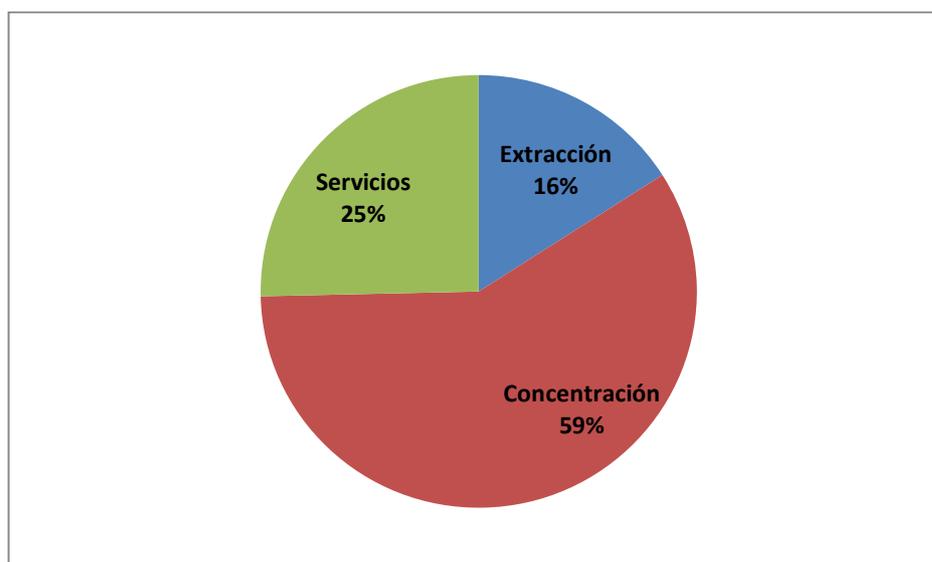


Figura C-9: Participación porcentual de los procesos en el consumo de energía eléctrica del Concentrado de Cobre de Salvador, año 2005<sup>196</sup>

<sup>195</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco.

<sup>196</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco.

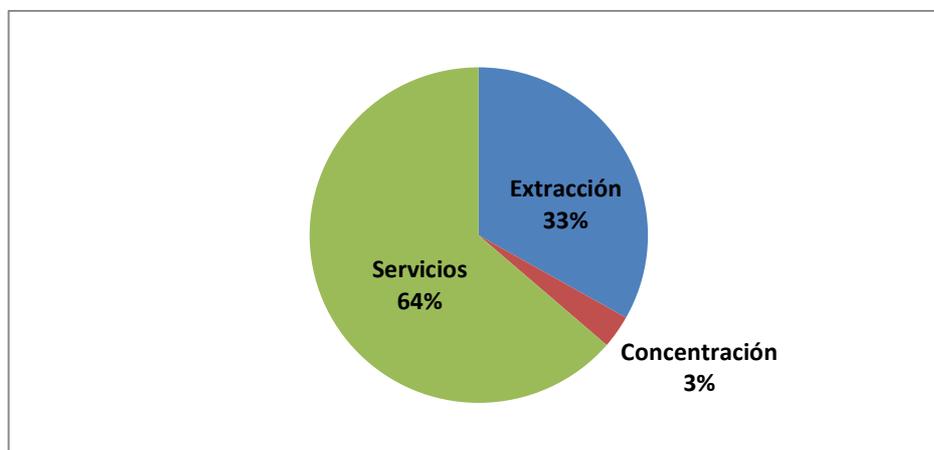


Figura C-10: Participación porcentual de los procesos en el consumo de combustible (en términos de energía) del Concentrado de Cobre de Salvador, año 2005<sup>197</sup>

## C.6 Cátodo ER de Salvador

Tabla C-6: Consumos unitarios de energía en el Cátodo ER de Salvador, en MJ/TMF\_Cu, año 2005. Criterio 1 <sup>198 199</sup>

PROCESO / FUENTE	Electricidad	Combustibles	Insumos	TOTAL
Extracción	1.531	919	152	<b>2.601</b>
Concentración	9.820	3.472	3.617	<b>16.910</b>
Fundición	618	5.008	351	<b>5.977</b>
Planta de Ácido	1.032	45	182	<b>1.259</b>
Electro Refinería	943	1.679	3	<b>2.625</b>
Servicios	2.868	2.079	0	<b>4.947</b>
<b>TOTAL</b>	<b>16.811</b> <sup>200</sup>	<b>13.203</b>	<b>4.305</b>	<b>34.319</b>

<sup>197</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco.

<sup>198</sup> El Criterio 1 considera todos los procesos de producción de los concentrados de cobre provenientes de Chuquicamata y Andina utilizados para la producción de Cátodo ER de Salvador, como parte del proceso Concentración para la producción de Cátodo ER de Salvador. En este proceso también se ha sumado el proceso de Concentración del Concentrado de Cobre de Salvador utilizado para la producción de Cátodo ER de Salvador. Para el proceso de Extracción de Cátodo ER de Salvador, se ha considerado por lo tanto solamente a la Extracción propia del Concentrado de Cobre de Salvador utilizado para la producción de Cátodo ER de Salvador.

<sup>199</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco.

<sup>200</sup> Esta tasa se puede desglosar como **14.599 MJ /TMF Cu** consumido en el SIC, y **2.211 MJ /TMF Cu** consumido en el SING (debido al uso de Concentrado de Cobre de Chuquicamata como insumo).

Tabla C-7: Consumos unitarios de energía en el Cátodo ER de Salvador, en MJ/TMF\_Cu, año 2005. Criterio 2 <sup>201 202</sup>

PROCESO / FUENTE	Electricidad	Combustibles	Insumos	TOTAL
Extracción	1.976	3.622	470	<b>6.068</b>
Concentración	8.610	277	3.289	<b>12.176</b>
Fundición	618	5.008	351	<b>5.977</b>
Planta de Ácido	1.032	45	182	<b>1.259</b>
Electro Refinería	943	1.679	3	<b>2.625</b>
Servicios	3.631	2.572	10	<b>6.213</b>
<b>TOTAL</b>	<b>16.811</b>	<b>13.203</b>	<b>4.305</b>	<b>34.319</b>

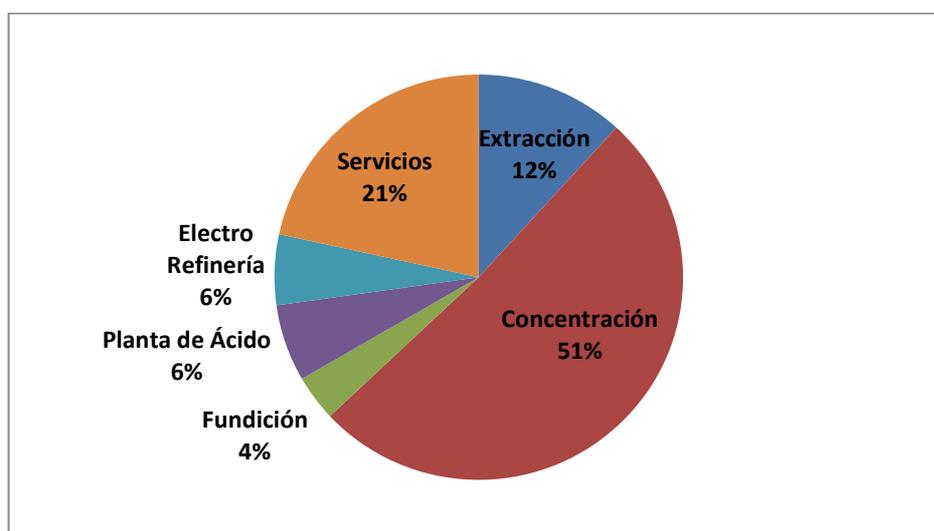


Figura C-11: Participación porcentual de los procesos en el consumo de energía eléctrica del Cátodo ER de Salvador, año 2005. Criterio 2 <sup>203</sup>

<sup>201</sup> El Criterio 2 distribuye los procesos de la producción de los concentrados de cobre provenientes de Chuquicamata y Andina utilizados para la producción de Cátodo ER de Salvador. Los procesos de Extracción de cada uno de ellos son sumados a la Extracción del Concentrado de Cobre de Salvador, conformando el proceso de Extracción para Cátodo ER de Salvador. Del mismo modo, los procesos de Concentración de estos concentrados son sumados al proceso de Concentración del Concentrado de Cobre de Salvador, conformando el proceso de Concentración de Cátodo ER de Salvador. Por último, los procesos de Servicios de estos concentrados son sumados al proceso de Servicios propio de Salvador, conformando el proceso de Servicios de Cátodo ER de Salvador.

<sup>202</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco.

<sup>203</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco.

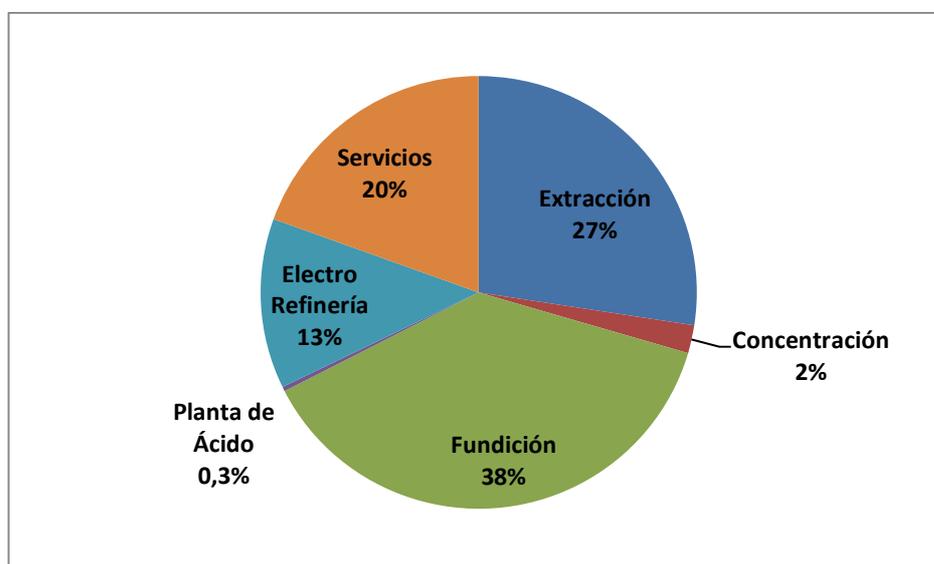


Figura C-12: Participación porcentual de los procesos en el consumo de combustible (en términos de energía) del Cátodo ER de Salvador, año 2005. Criterio 2 <sup>204</sup> <sup>205</sup>

### C.7 Cátodo EO de Salvador

Tabla C-8: Consumos unitarios de energía en el Cátodo EO de Salvador, en MJ/TMF\_Cu, año 2005 <sup>206</sup>

PROCESO / FUENTE	Electricidad	Combustibles	Insumos	TOTAL
Extracción	0	4.327	1.801	<b>6.129</b>
Hidrometalurgia	10.997	2.667	29	<b>13.693</b>
Servicios	4.275	3.099	0	<b>7.374</b>
<b>TOTAL</b>	<b>15.271</b>	<b>10.093</b>	<b>1.830</b>	<b>27.195</b>

<sup>204</sup> El Criterio 2 distribuye los procesos de la producción de los concentrados de cobre provenientes de Chuquicamata y Andina utilizados para la producción de Cátodo ER de Salvador. Los procesos de Extracción de cada uno de ellos son sumados a la Extracción del Concentrado de Cobre de Salvador, conformando el proceso de Extracción para Cátodo ER de Salvador. Del mismo modo, los procesos de Concentración de estos concentrados son sumados al proceso de Concentración del Concentrado de Cobre de Salvador, conformando el proceso de Concentración de Cátodo ER de Salvador. Por último, los procesos de Servicios de estos concentrados son sumados al proceso de Servicios propio de Salvador, conformando el proceso de Servicios de Cátodo ER de Salvador.

<sup>205</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco.

<sup>206</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco.

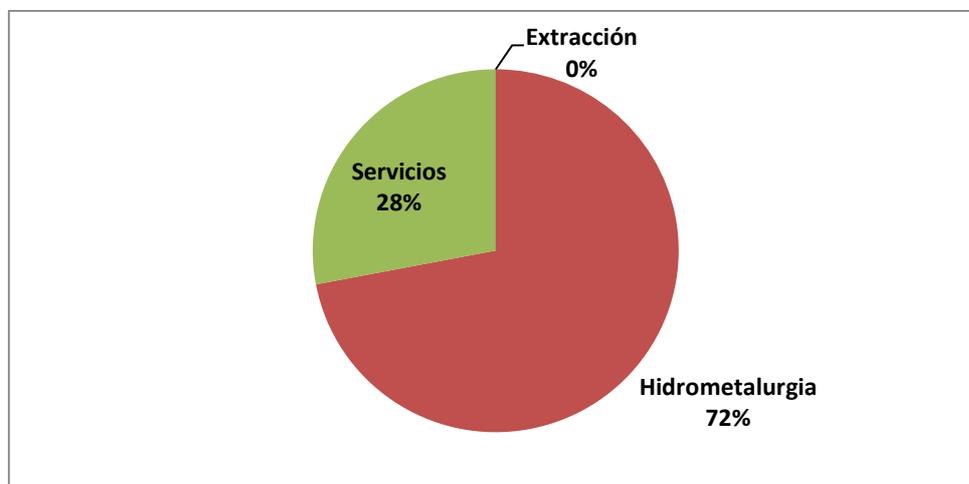


Figura C-13: Participación porcentual de los procesos en el consumo de energía eléctrica del Cátodo EO de Salvador, año 2005 <sup>207</sup>

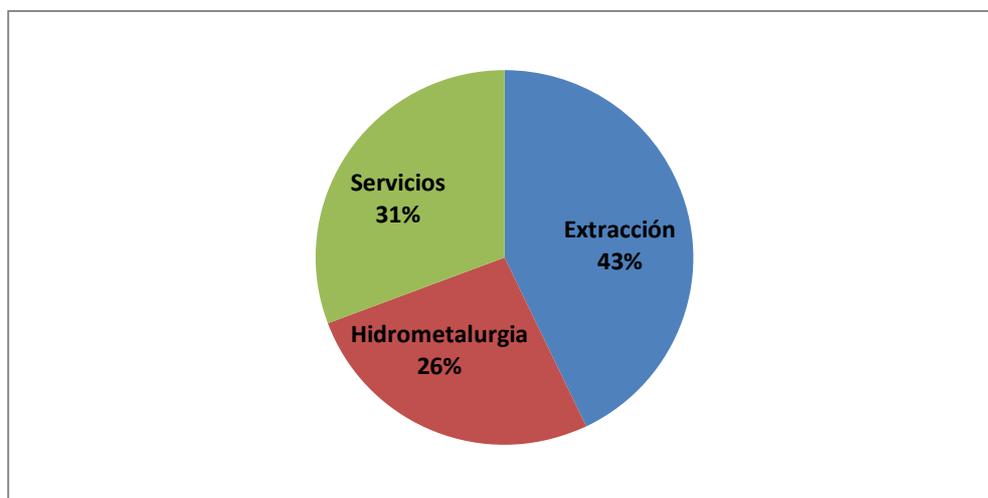


Figura C-14: Participación porcentual de los procesos en el consumo de combustible (en términos de energía) del Cátodo EO de Salvador, año 2005 <sup>208</sup>

---

<sup>207</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco.

<sup>208</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco.

## C.8 Concentrado de Cobre de Andina

Tabla C-9: Consumos unitarios de energía en el Concentrado de Cobre de Andina, en MJ/TMF Cu, año 2005 <sup>209</sup>

PROCESO / FUENTE	Electricidad	Combustibles	Insumos	TOTAL
Extracción	1.316	2.508	618	<b>4.442</b>
Concentración	7.355	570	2.029	<b>9.954</b>
Servicios	79	160	43	<b>282</b>
<b>TOTAL</b>	<b>8.751</b>	<b>3.238</b>	<b>2.690</b>	<b>14.678</b>

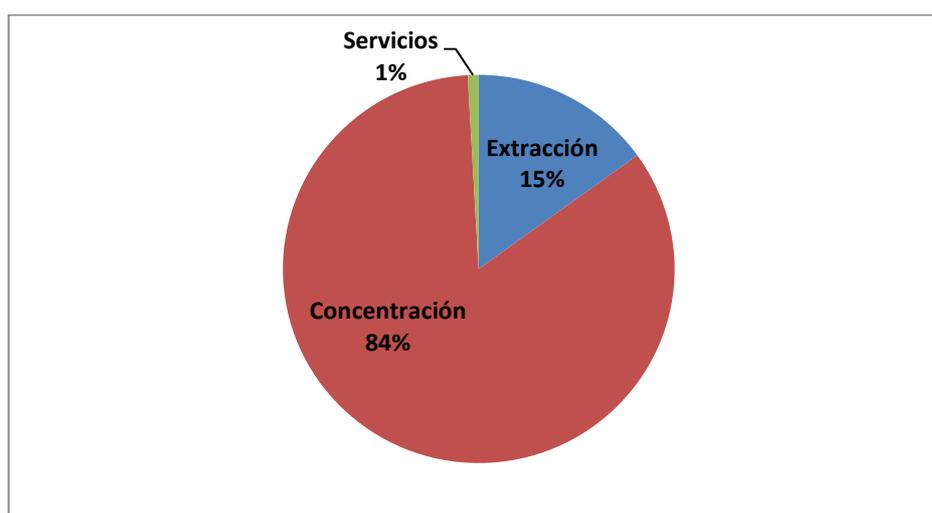


Figura C-15: Participación porcentual de los procesos en el consumo de energía eléctrica del Concentrado de Cobre de Andina, año 2005 <sup>210</sup>

<sup>209</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco.

<sup>210</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco.

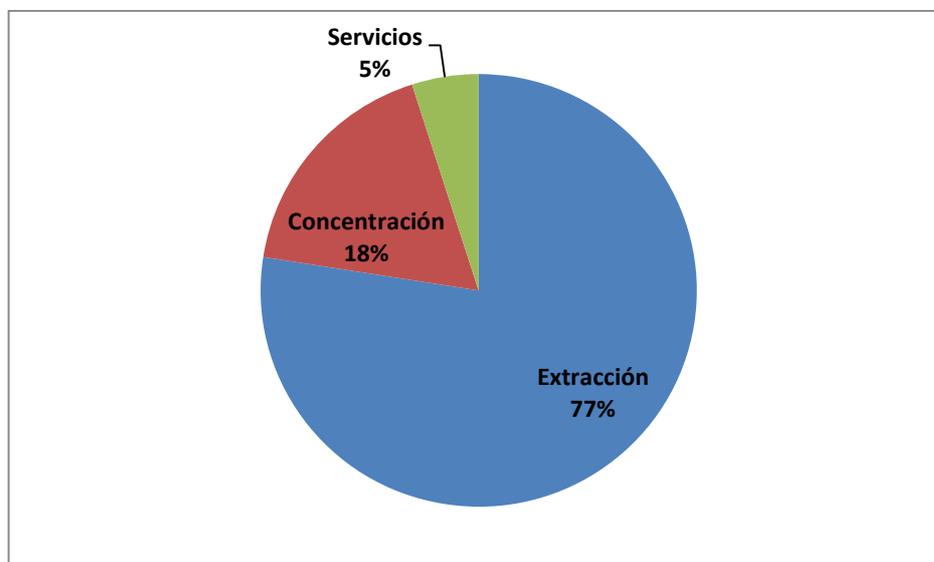


Figura C-16: Participación porcentual de los procesos en el consumo de combustible (en términos de energía) del Concentrado de Cobre de Andina, año 2005 <sup>211</sup>

### C.9 Concentrado de Cobre de El Teniente

Tabla C-10: Consumos unitarios de energía en el Concentrado de Cobre de El Teniente, en MJ/TMF\_Cu, año 2005 <sup>212</sup>

PROCESO / FUENTE	Electricidad	Combustibles	Insumos	TOTAL
Extracción	1.720	854	606	<b>3.180</b>
Concentración	9.293	540	1.510	<b>11.342</b>
Servicios	226	245	0	<b>472</b>
<b>TOTAL</b>	<b>11.240</b>	<b>1.639</b>	<b>2.116</b>	<b>14.994</b>

<sup>211</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco.

<sup>212</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco.

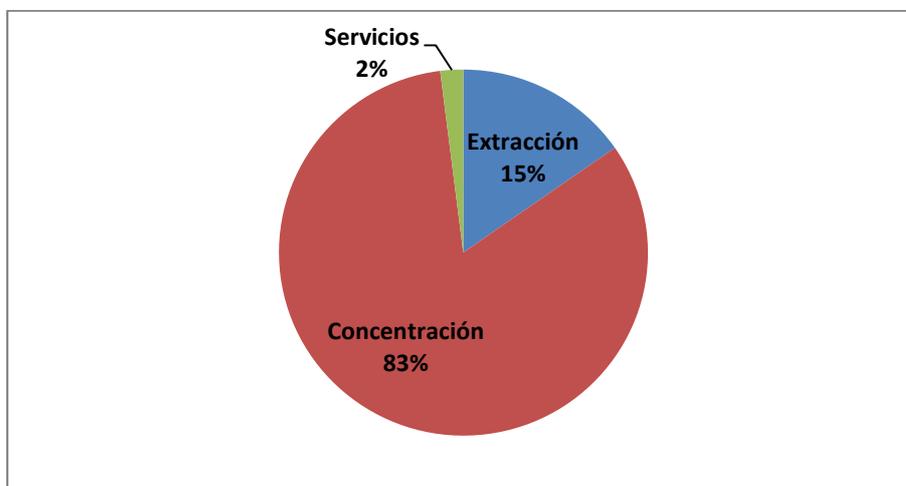


Figura C-17: Participación porcentual de los procesos en el consumo de energía eléctrica del Concentrado de Cobre de El Teniente, año 2005 <sup>213</sup>

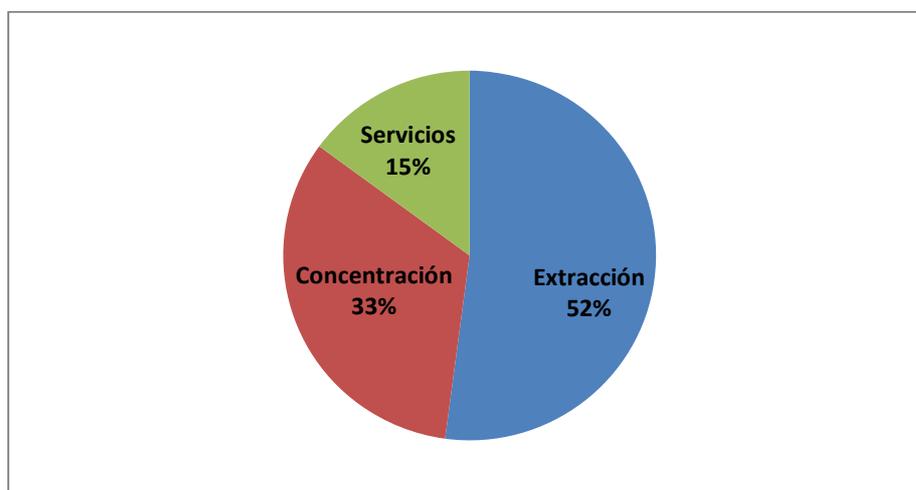


Figura C-18: Participación porcentual de los procesos en el consumo de combustible (en términos de energía) del Concentrado de Cobre de El Teniente, año 2005 <sup>214</sup>

<sup>213</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco.

<sup>214</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco.

### C.10 Cátodo ER de El Teniente/Ventanas

Tabla C-11: Consumos unitarios de energía en el Cátodo ER de El Teniente/Ventanas, en MJ/TMF Cu, año 2005 <sup>215</sup>

PROCESO / FUENTE	Electricidad	Combustibles	Insumos	TOTAL
Extracción	2.041	1.013	719	<b>3.774</b>
Concentración	11.027	640	1.792	<b>13.459</b>
Fundición	1.573	5.341	304	<b>7.218</b>
Planta de Ácido	1.151	173	198	<b>1.521</b>
Electro Refinería	1.498	1.358	96	<b>2.952</b>
Servicios	392	424	0	<b>817</b>
<b>TOTAL</b>	<b>17.683</b>	<b>8.950</b>	<b>3.108</b>	<b>29.740</b>

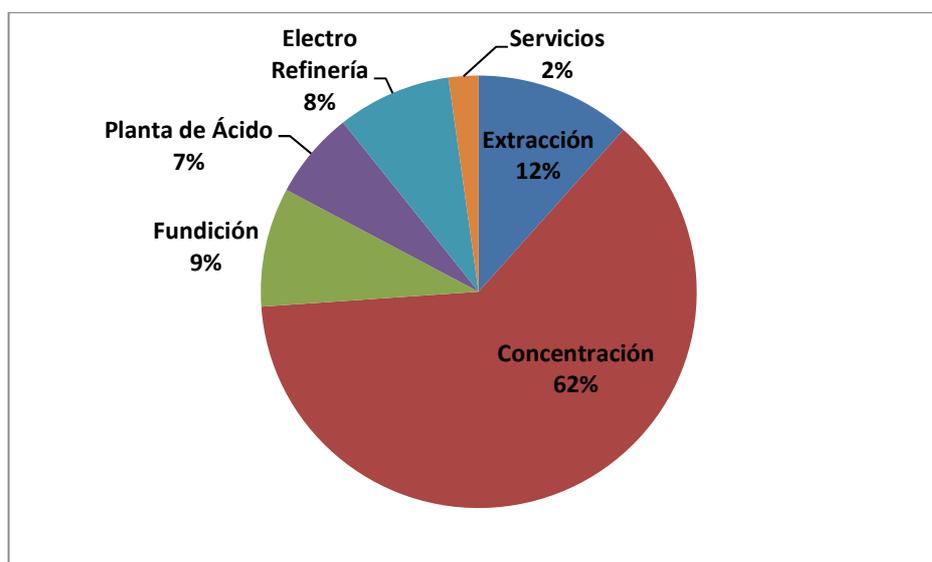


Figura C-19: Participación porcentual de los procesos en el consumo de energía eléctrica del Cátodo ER de El Teniente/Ventanas, año 2005 <sup>216</sup>

<sup>215</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco.

<sup>216</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco.

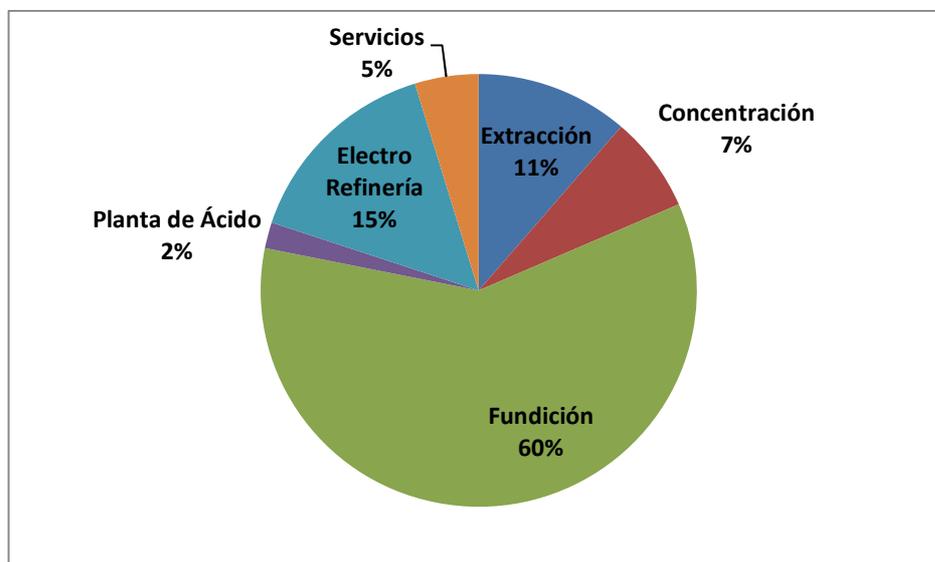


Figura C-20: Participación porcentual de los procesos en el consumo de combustible (en términos de energía) del Cátodo ER de El Teniente/Ventanas, año 2005 <sup>217</sup>

### C.11 RAF de El Teniente

Tabla C-12: Consumos unitarios de energía en el RAF de El Teniente, en MJ/TMF Cu, año 2005 <sup>218</sup>

PROCESO / FUENTE	Electricidad	Combustibles	Insumos	TOTAL
Extracción	2.041	1.013	719	<b>3.774</b>
Concentración	11.027	640	1.792	<b>13.459</b>
Fundición	1.573	5.341	304	<b>7.218</b>
Planta de Ácido	1.151	173	198	<b>1.521</b>
Servicios	392	424	0	<b>817</b>
<b>TOTAL</b>	<b>16.185</b>	<b>7.592</b>	<b>3.012</b>	<b>26.788</b>

<sup>217</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco.

<sup>218</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco.

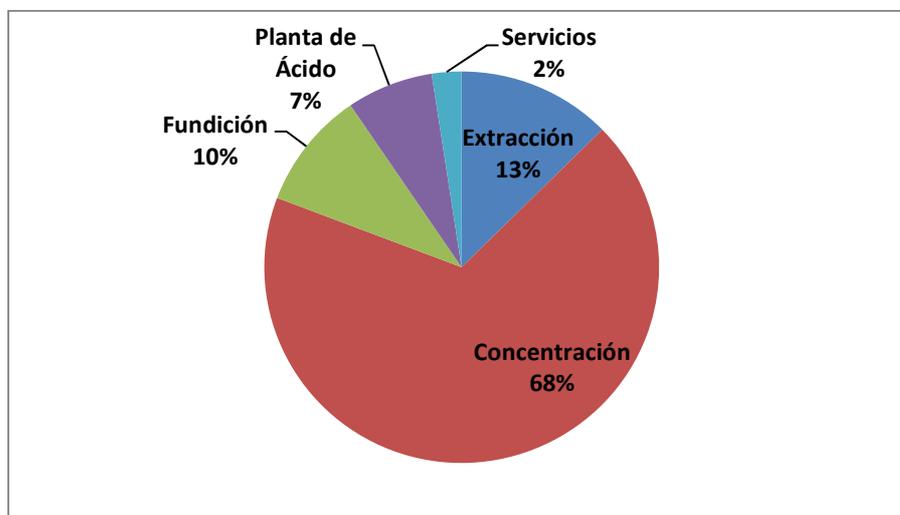


Figura C-21: Participación porcentual de los procesos en el consumo de energía eléctrica del RAF de El Teniente, año 2005 <sup>219</sup>

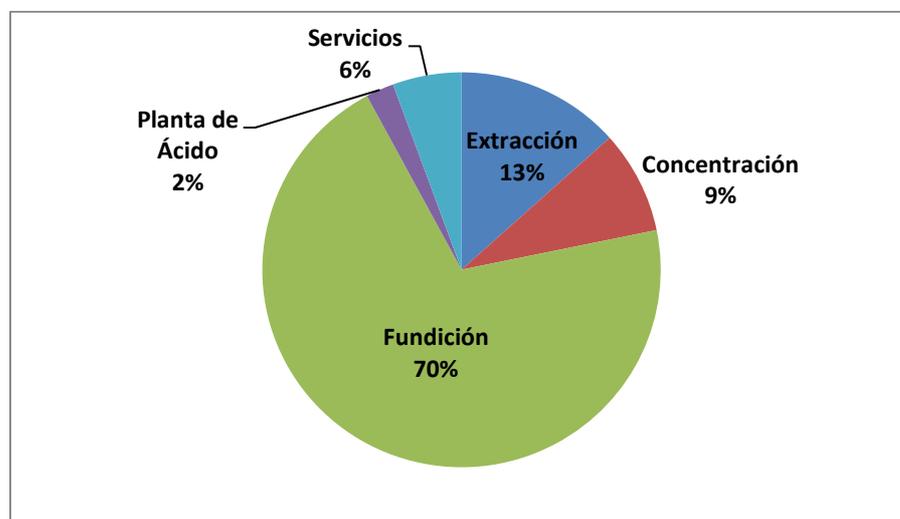


Figura C-22: Participación porcentual de los procesos en el consumo de combustible (en términos de energía) del RAF de El Teniente, año 2005

<sup>219</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco.

## C.12 Contribución según tipo de insumo en los consumos energéticos de Alcance III en cada producto

Tabla C-13: Consumo energético en fabricación de insumos utilizados, año 2005 <sup>220</sup>

INSUMOS/PRODUCTO	CONCENTR ADO CHUQUI	CÁTOD ER CHUQUI	CÁTOD EO CHUQUI	CÁTOD EO RT	CONCENTR ADO SALVADOR	CÁTOD ER SALVADOR	CÁTOD EO SALVADOR	CONCENTR ADO ANDINA	CONCENTR ADO TENIENTE	CÁTOD ER TENIENTE/ VENTANAS	RAF TENIENTE
UNIDAD	MJ/TMF Cu										
Amoniaco (NH3)	547,53	576,13	603,87	911,76	12,57	310,97	1.756,80	559,28	169,99	201,71	201,71
Oxígeno gaseoso (1)	0,03	0,09	0,01			0,05		0,19	0,24	53,07	53,07
Oxígeno gaseoso (2)									0,08	0,10	0,10
Hidrógeno										0,00	
Peróxido de hidrógeno (50%; H2O2)						28,49		126,10			
Nitrógeno líquido						0,00		0,00		0,11	
Argón gaseoso										0,00	
Ácido Nítrico (HNO3)					8,41	4,14					
Solución de Ácido Clorhídrico						0,18			0,01	0,32	0,32
Propileno glicol (vía hidratación del óxido de propileno) (1)	0,60	0,63	0,10			0,20			3,37	3,99	3,99
Propileno glicol (vía hidratación del óxido de propileno) (2)						3,25	2,54	14,39			
Acetileno (C2H2)						0,35		1,55			
Etilenglicol (vía oxidación de metano)						0,94	27,59	4,16			
Hidróxido de sodio (NaOH) (por electrólisis de NaCl con célula de diafragma)										44,35	
Hidróxido de sodio (NaOH) al 100%		2,83	2,66	1,95		0,00			0,17	4,68	4,68

<sup>220</sup> Elaboración propia utilizando GaBi con datos de Codelco.

INSUMOS/PRODUCTO	CONCENTR ADO CHUQUI	CÁTOD ER CHUQUI	CÁTOD EO CHUQUI	CÁTOD EO RT	CONCENTR ADO SALVADOR	CÁTOD ER SALVADOR	CÁTOD EO SALVADOR	CONCENTR ADO ANDINA	CONCENTR ADO TENIENTE	CÁTOD ER TENIENTE/ VENTANAS	RAF TENIENTE
UNIDAD	MJ/TMF Cu										
Hidróxido de sodio (NaOH) al 50% (1)		13,12				0,00					
Hidróxido de sodio (NaOH) al 50% (2)										31,18	
Cloruro de sodio (NaCl)						11,18		47,89			
Carbonato de sodio (Na2CO3)							2,00				
Arena de sílice (excavación y procesamiento)		143,55	0,12		2,81	217,18				224,13	224,13
Arena de sílice (flour)		1.107,81				0,00					
Láminas de acero	2.526,87	2.672,21	2,88	1,21	3.782,20	2.935,80	41,27	748,32	1.608,09	1.952,48	1.932,51
Láminas de acero secundario						114,23		505,62	225,91	268,08	268,08
Madera de pino (12% de humedad)	0,02	0,49	0,70	0,01	14,92	7,64	0,22	1,14	5,25	6,43	6,43
Neumáticos de camión (1)	0,02	0,03	0,01	0,10	0,06	0,04					
Traslado de insumos	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Concreto	2,02	3,52			96,05	50,98		13,33	79,36	94,18	94,18
Cal (CaO)	699,59	852,06	142,04	103,86	2,95	619,77		667,74	23,27	222,84	222,84
Neumáticos de camión (2)						0,00		0,02	0,01	0,01	0,01
Asignaciones Mina A1	0,00	0,00	0,00			0,00					
Asignaciones Mina A2			0,00			0,00					
Asignaciones Mina A3				0,00							
Asignaciones Mina B1							0,00				
Asignaciones Mina B2					0,00	0,00					
Asignaciones Mina C1						0,00		0,00			
Asignaciones Mina C2						0,00		0,00			
Asignaciones Mina D1									0,00	0,00	0,00
<b>SUMA</b>	<b>3.777</b>	<b>5.372</b>	<b>752</b>	<b>1.019</b>	<b>3.920</b>	<b>4.305</b>	<b>1.830</b>	<b>2.690</b>	<b>2.116</b>	<b>3.108</b>	<b>3.012</b>

## **D. SENSIBILIDAD DE LA MATRIZ ELÉCTRICA EN EMISIONES DE GEI EN LOS PRODUCTOS MODELADOS EN GABI**

### **D.1 Concentrado de Cobre de Chuquicamata**

- Emisiones unitarias no eléctricas: **1.018 kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu**
- Expresión para las emisiones unitarias, en kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu, año 2005 <sup>221</sup>:

$$E_u = 1.018,46 + 2.174,46 \times C + 2.242,36 \times D + 45,21 \times H + 1.173,54 \times G$$

Donde: **E<sub>u</sub>** = Emisiones unitarias, **C** = Porcentaje del SING de Térmica a carbón, **D** = Porcentaje del SING de Térmica a diesel, **H** = Porcentaje del SING de Hidroeléctrica, **G** = Porcentaje del SING de Térmica a gas natural.

Tabla D-1: Emisiones del Concentrado de Cobre de Chuquicamata, utilizando la expresión de emisiones unitarias del 2005 evaluada por la matriz eléctrica de cada año del período 2005-2009, en kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu <sup>222</sup>

<b>Emisiones No Eléctricas</b>	<b>1.018</b>	
<b>Año/Emisiones</b>	<b>Eléctricas</b>	<b>Total</b>
<b>2005</b>	<b>1.529</b>	<b>2.548</b>
<b>2006</b>	<b>1.680</b>	<b>2.698</b>
<b>2007</b>	<b>1.951</b>	<b>2.970</b>
<b>2008</b>	<b>2.066</b>	<b>3.085</b>
<b>2009</b>	<b>1.980</b>	<b>2.998</b>
<b>Promedio</b>	<b>1.841</b>	<b>2.860</b>
<b>100% Térmica Carbón</b>	<b>2.174</b>	<b>3.193</b>
<b>100% Térmica Diesel</b>	<b>2.242</b>	<b>3.261</b>
<b>100% Hidroeléctrica</b>	<b>45</b>	<b>1.064</b>
<b>100% Térmica Gas Natural</b>	<b>1.174</b>	<b>2.192</b>

<sup>221</sup> Expresión construida a partir de las emisiones unitarias provenientes de los combustibles, insumos y electricidad, y de los factores de emisión desarrollados por GaBi para Chile según tipo de fuente. Esta expresión mantiene fija las emisiones unitarias provenientes de los combustibles e insumos, y hace variar las emisiones unitarias del consumo eléctrico dependiendo de la composición de la matriz eléctrica.

<sup>222</sup> Elaboración propia a partir de la evaluación de la expresión de emisiones unitarias construida para este producto.

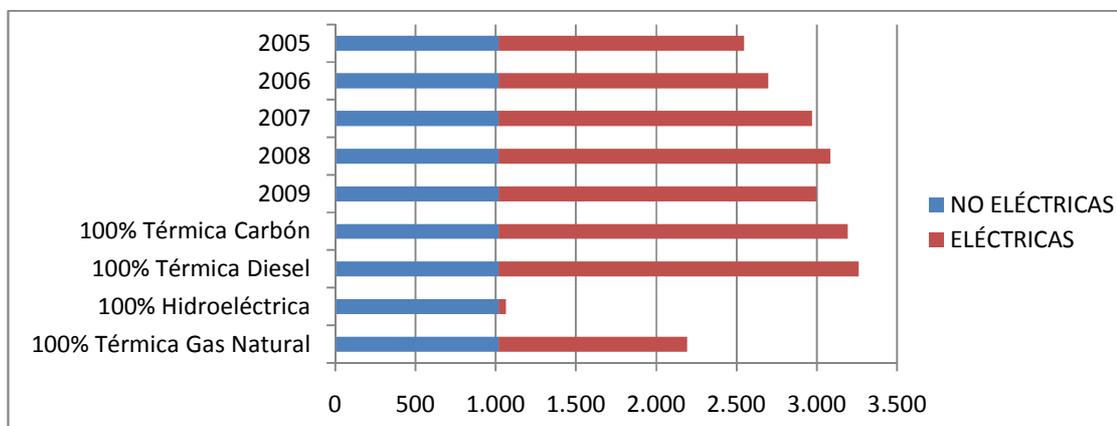


Figura D-1: Emisiones del Concentrado de Cobre de Chuquicamata, utilizando la expresión de emisiones unitarias del 2005 evaluada por la matriz eléctrica de cada año del período 2005-2009, en kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu <sup>223</sup>

## D.2 Cátodo ER de Chuquicamata

- Emisiones unitarias no eléctricas: **1.584 kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu**
- Expresión para las emisiones unitarias, en kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu, año 2005 <sup>224</sup>:

$$E_u = 1.584,20 + 4.714,57 \times C + 4.861,78 \times D + 98,02 \times H + 2.544,40 \times G$$

Donde:  $E_u$  = Emisiones unitarias,  $C$  = Porcentaje del SING de Térmica a carbón,  $D$  = Porcentaje del SING de Térmica a diesel,  $H$  = Porcentaje del SING de Hidroeléctrica,  $G$  = Porcentaje del SING de Térmica a gas natural.

<sup>223</sup> Elaboración propia a partir de la evaluación de la expresión de emisiones unitarias construida para este producto.

<sup>224</sup> Expresión construida a partir de las emisiones unitarias provenientes de los combustibles, insumos y electricidad, y de los factores de emisión desarrollados por GaBi para Chile según tipo de fuente. Esta expresión mantiene fija las emisiones unitarias provenientes de los combustibles e insumos, y hace variar las emisiones unitarias del consumo eléctrico dependiendo de la composición de la matriz eléctrica.

Tabla D-2: Emisiones del Cátodo ER de Chuquicamata, utilizando la expresión de emisiones unitarias del 2005 evaluada por la matriz eléctrica de cada año del período 2005-2009, en kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu <sup>225</sup>

<b>Emisiones No Eléctricas</b>	<b>1.584</b>	
<b>Año/Emisiones</b>	<b>Eléctricas</b>	<b>Total</b>
<b>2005</b>	<b>3.316</b>	<b>4.900</b>
<b>2006</b>	<b>3.642</b>	<b>5.226</b>
<b>2007</b>	<b>4.231</b>	<b>5.815</b>
<b>2008</b>	<b>4.480</b>	<b>6.064</b>
<b>2009</b>	<b>4.292</b>	<b>5.876</b>
<b>Promedio</b>	<b>3.992</b>	<b>5.576</b>
<b>100% Térmica Carbón</b>	<b>4.715</b>	<b>6.299</b>
<b>100% Térmica Diesel</b>	<b>4.862</b>	<b>6.446</b>
<b>100% Hidroeléctrica</b>	<b>98</b>	<b>1.682</b>
<b>100% Térmica Gas Natural</b>	<b>2.544</b>	<b>4.129</b>

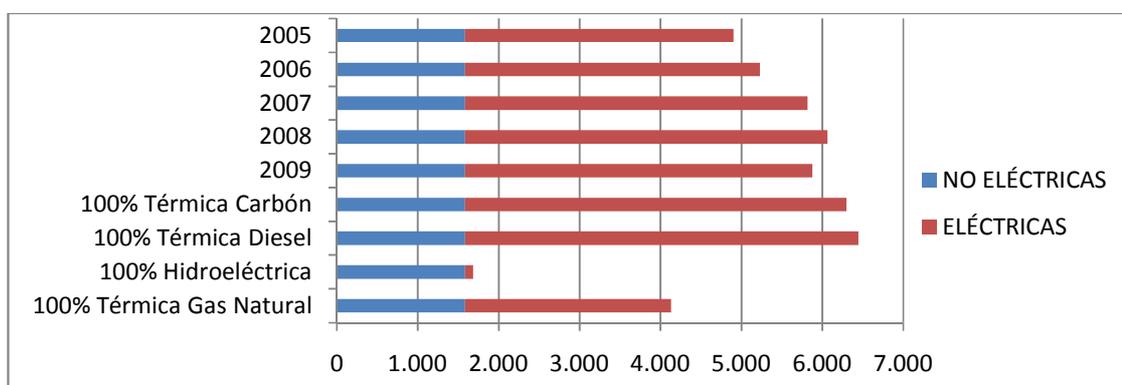


Figura D-2: Emisiones del Cátodo ER de Chuquicamata, utilizando la expresión de emisiones unitarias del 2005 evaluada por la matriz eléctrica de cada año del período 2005-2009, en kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu <sup>226</sup>

<sup>225</sup> Elaboración propia a partir de la evaluación de la expresión de emisiones unitarias construida para este producto.

<sup>226</sup> Elaboración propia a partir de la evaluación de la expresión de emisiones unitarias construida para este producto.

### D.3 Cátodo EO de Chuquicamata

- Emisiones unitarias no eléctricas: **704 kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu**
- Expresión para las emisiones unitarias, en kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu, año 2005 <sup>227</sup>:

$$E_u = 704,06 + 4.310,20 \times C + 4.444,78 \times D + 89,61 \times H + 2.326,17 \times G$$

Donde: **E<sub>u</sub>** = Emisiones unitarias, **C** = Porcentaje del SING de Térmica a carbón, **D** = Porcentaje del SING de Térmica a diesel, **H** = Porcentaje del SING de Hidroeléctrica, **G** = Porcentaje del SING de Térmica a gas natural.

Tabla D-3: Emisiones del Cátodo EO de Chuquicamata, utilizando la expresión de emisiones unitarias del 2005 evaluada por la matriz eléctrica de cada año del período 2005-2009, en kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu <sup>228</sup>

<b>Emisiones No Eléctricas</b>	<b>704</b>	
<b>Año/Emisiones</b>	<b>Eléctricas</b>	<b>Total</b>
<b>2005</b>	<b>3.031</b>	<b>3.736</b>
<b>2006</b>	<b>3.330</b>	<b>4.034</b>
<b>2007</b>	<b>3.868</b>	<b>4.572</b>
<b>2008</b>	<b>4.095</b>	<b>4.799</b>
<b>2009</b>	<b>3.924</b>	<b>4.628</b>
<b>Promedio</b>	<b>3.650</b>	<b>4.354</b>
<b>100% Térmica Carbón</b>	<b>4.310</b>	<b>5.014</b>
<b>100% Térmica Diesel</b>	<b>4.445</b>	<b>5.149</b>
<b>100% Hidroeléctrica</b>	<b>90</b>	<b>794</b>
<b>100% Térmica Gas Natural</b>	<b>2.326</b>	<b>3.030</b>

<sup>227</sup> Expresión construida a partir de las emisiones unitarias provenientes de los combustibles, insumos y electricidad, y de los factores de emisión desarrollados por GaBi para Chile según tipo de fuente. Esta expresión mantiene fija las emisiones unitarias provenientes de los combustibles e insumos, y hace variar las emisiones unitarias del consumo eléctrico dependiendo de la composición de la matriz eléctrica.

<sup>228</sup> Elaboración propia a partir de la evaluación de la expresión de emisiones unitarias construida para este producto.

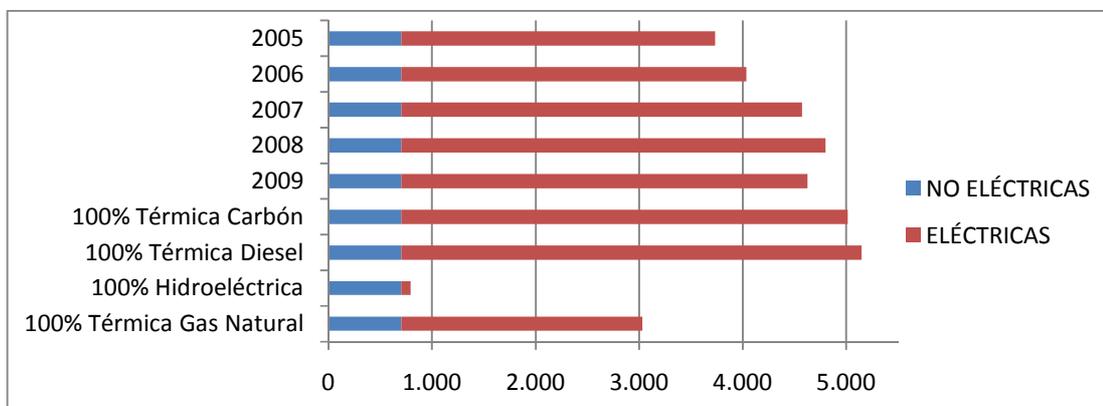


Figura D-3: Emisiones del Cátodo EO de Chuquicamata, utilizando la expresión de emisiones unitarias del 2005 evaluada por la matriz eléctrica de cada año del período 2005-2009, en kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu <sup>229</sup>

#### D.4 Cátodo EO de Radomiro Tomic

- Emisiones unitarias no eléctricas: **962 kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu**
- Expresión para las emisiones unitarias, en kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu, año 2005 <sup>230</sup>:

$$E_u = 961,96 + 4.172,72 \times C + 4.303,01 \times D + 86,75 \times H + 2.251,97 \times G$$

Donde:  $E_u$  = Emisiones unitarias,  $C$  = Porcentaje del SING de Térmica a carbón,  $D$  = Porcentaje del SING de Térmica a diesel,  $H$  = Porcentaje del SING de Hidroeléctrica,  $G$  = Porcentaje del SING de Térmica a gas natural.

<sup>229</sup> Elaboración propia a partir de la evaluación de la expresión de emisiones unitarias construida para este producto.

<sup>230</sup> Expresión construida a partir de las emisiones unitarias provenientes de los combustibles, insumos y electricidad, y de los factores de emisión desarrollados por GaBi para Chile según tipo de fuente. Esta expresión mantiene fija las emisiones unitarias provenientes de los combustibles e insumos, y hace variar las emisiones unitarias del consumo eléctrico dependiendo de la composición de la matriz eléctrica.

Tabla D-4: Emisiones del Cátodo EO de Radomiro Tomic, utilizando la expresión de emisiones unitarias del 2005 evaluada por la matriz eléctrica de cada año del período 2005-2009, en kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu <sup>231</sup>

<b>Emisiones No Eléctricas</b>	<b>962</b>	
<b>Año/Emisiones</b>	<b>Eléctricas</b>	<b>Total</b>
<b>2005</b>	<b>2.935</b>	<b>3.897</b>
<b>2006</b>	<b>3.223</b>	<b>4.185</b>
<b>2007</b>	<b>3.745</b>	<b>4.707</b>
<b>2008</b>	<b>3.965</b>	<b>4.927</b>
<b>2009</b>	<b>3.799</b>	<b>4.761</b>
<b>Promedio</b>	<b>3.533</b>	<b>4.495</b>
<b>100% Térmica Carbón</b>	<b>4.173</b>	<b>5.135</b>
<b>100% Térmica Diesel</b>	<b>4.303</b>	<b>5.265</b>
<b>100% Hidroeléctrica</b>	<b>87</b>	<b>1.049</b>
<b>100% Térmica Gas Natural</b>	<b>2.252</b>	<b>3.214</b>

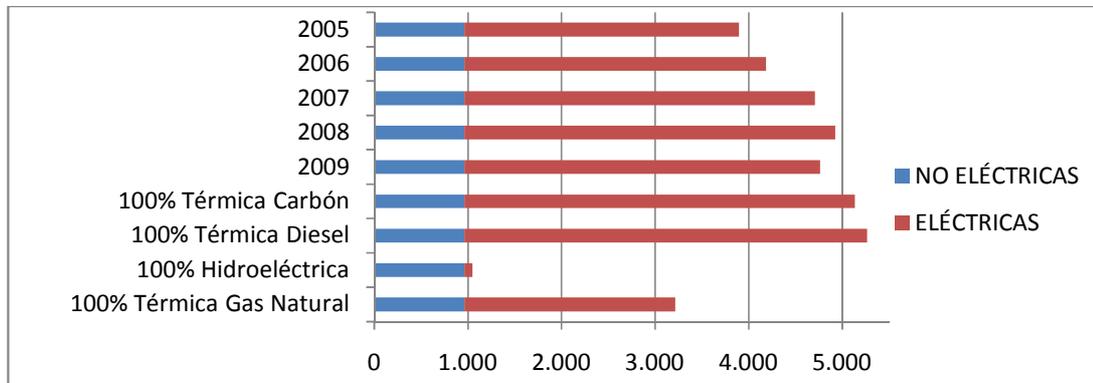


Figura D-4: Emisiones del Cátodo EO de Radomiro Tomic, utilizando la expresión de emisiones unitarias del 2005 evaluada por la matriz eléctrica de cada año del período 2005-2009, en kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu <sup>232</sup>

<sup>231</sup> Elaboración propia a partir de la evaluación de la expresión de emisiones unitarias construida para este producto.

<sup>232</sup> Elaboración propia a partir de la evaluación de la expresión de emisiones unitarias construida para este producto.

## D.5 Concentrado de Cobre de Salvador

- Emisiones unitarias no eléctricas: **861 kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu**
- Expresión para las emisiones unitarias, en kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu, año 2005 <sup>233</sup>:

$$E_u = 860,68 + 6.242,09 \times C + 6.437,00 \times D + 129,77 \times H + 3.368,79 \times G$$

Donde: **E<sub>u</sub>** = Emisiones unitarias, **C** = Porcentaje del SIC de Térmica a carbón, **D** = Porcentaje del SIC de Térmica a diesel, **H** = Porcentaje del SIC de Hidroeléctrica, **G** = Porcentaje del SIC de Térmica a gas natural.

Tabla D-5: Emisiones del Concentrado de Cobre de Salvador, utilizando la expresión de emisiones unitarias del 2005 evaluada por la matriz eléctrica de cada año del período 2005-2009, en kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu <sup>234</sup>

<b>Emisiones No Eléctricas</b>	<b>861</b>	
<b>Año/Emisiones</b>	<b>Eléctricas</b>	<b>Total</b>
<b>2005</b>	<b>1.656</b>	<b>2.516</b>
<b>2006</b>	<b>1.578</b>	<b>2.438</b>
<b>2007</b>	<b>2.877</b>	<b>3.737</b>
<b>2008</b>	<b>2.761</b>	<b>3.622</b>
<b>2009</b>	<b>2.544</b>	<b>3.404</b>
<b>Promedio</b>	<b>2.283</b>	<b>3.144</b>
<b>100% Térmica Carbón</b>	<b>6.242</b>	<b>7.103</b>
<b>100% Térmica Diesel</b>	<b>6.437</b>	<b>7.298</b>
<b>100% Hidroeléctrica</b>	<b>130</b>	<b>990</b>
<b>100% Térmica Gas Natural</b>	<b>3.369</b>	<b>4.229</b>

<sup>233</sup> Expresión construida a partir de las emisiones unitarias provenientes de los combustibles, insumos y electricidad, y de los factores de emisión desarrollados por GaBi para Chile según tipo de fuente. Esta expresión mantiene fija las emisiones unitarias provenientes de los combustibles e insumos, y hace variar las emisiones unitarias del consumo eléctrico dependiendo de la composición de la matriz eléctrica.

<sup>234</sup> Elaboración propia a partir de la evaluación de la expresión de emisiones unitarias construida para este producto.

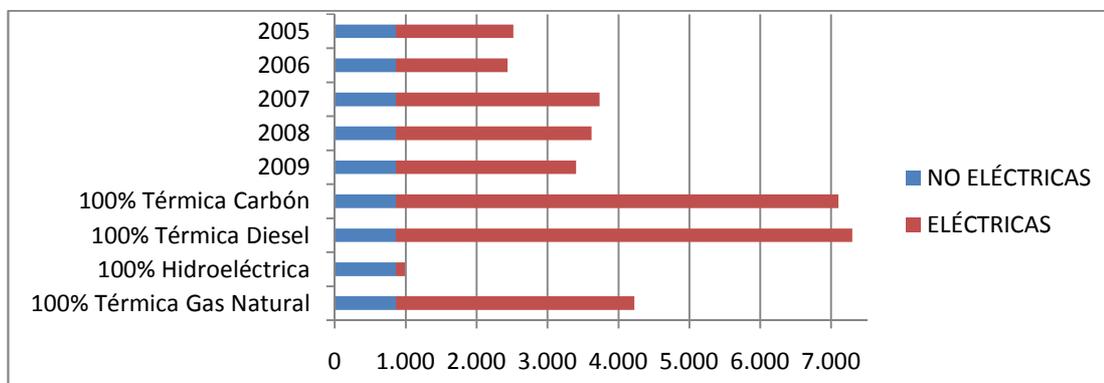


Figura D-5: Emisiones del Concentrado de Cobre de Salvador, utilizando la expresión de emisiones unitarias del 2005 evaluada por la matriz eléctrica de cada año del período 2005-2009, en kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu <sup>235</sup>

#### D.6 Cátodo ER de Salvador

- Emisiones unitarias no eléctricas: **1.521 kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu**
- Expresión para las emisiones unitarias, en kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu, año 2005 <sup>236</sup>:

$$E_u = 1.520,75 + 4.678,34 \times C + 4.824,42 \times D + 97,26 \times H + 2.524,85 \times G \\ + 708,60 \times C_{SING} + 730,72 \times D_{SING} + 14,73 \times H_{SING} + 382,42 \times G_{SING}$$

Donde:  $E_u$  = Emisiones unitarias,  $C$  = Porcentaje del SIC de Térmica a carbón,  $D$  = Porcentaje del SIC de Térmica a diesel,  $H$  = Porcentaje del SIC de Hidroeléctrica,  $G$  = Porcentaje del SIC de Térmica a gas natural,  $C_{SING}$  = Porcentaje del SING de Térmica a carbón,  $D_{SING}$  = Porcentaje del SING de Térmica a diesel,  $H_{SING}$  = Porcentaje del SING de Hidroeléctrica,  $G_{SING}$  = Porcentaje del SING de Térmica a gas natural.

<sup>235</sup> Elaboración propia a partir de la evaluación de la expresión de emisiones unitarias construida para este producto.

<sup>236</sup> Expresión construida a partir de las emisiones unitarias provenientes de los combustibles, insumos y electricidad, y de los factores de emisión desarrollados por GaBi para Chile según tipo de fuente. Esta expresión mantiene fija las emisiones unitarias provenientes de los combustibles e insumos, y hace variar las emisiones unitarias del consumo eléctrico dependiendo de la composición de la matriz eléctrica.

Tabla D-6: Emisiones del Cátodo ER de Salvador, utilizando la expresión de emisiones unitarias del 2005 evaluada por la matriz eléctrica de cada año del período 2005-2009, en kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu <sup>237</sup>

<b>Emisiones No Eléctricas</b>	<b>1.521</b>	
<b>Año/Emisiones</b>	<b>Eléctricas</b>	<b>Total</b>
<b>2005</b>	<b>1.739</b>	<b>3.260</b>
<b>2006</b>	<b>1.730</b>	<b>3.251</b>
<b>2007</b>	<b>2.792</b>	<b>4.313</b>
<b>2008</b>	<b>2.742</b>	<b>4.263</b>
<b>2009</b>	<b>2.552</b>	<b>4.072</b>
<b>Promedio</b>	<b>2.311</b>	<b>3.832</b>
<b>100% Térmica Carbón</b>	<b>5.387</b>	<b>6.908</b>
<b>100% Térmica Diesel</b>	<b>5.555</b>	<b>7.076</b>
<b>100% Hidroeléctrica</b>	<b>112</b>	<b>1.633</b>
<b>100% Térmica Gas Natural</b>	<b>2.907</b>	<b>4.428</b>

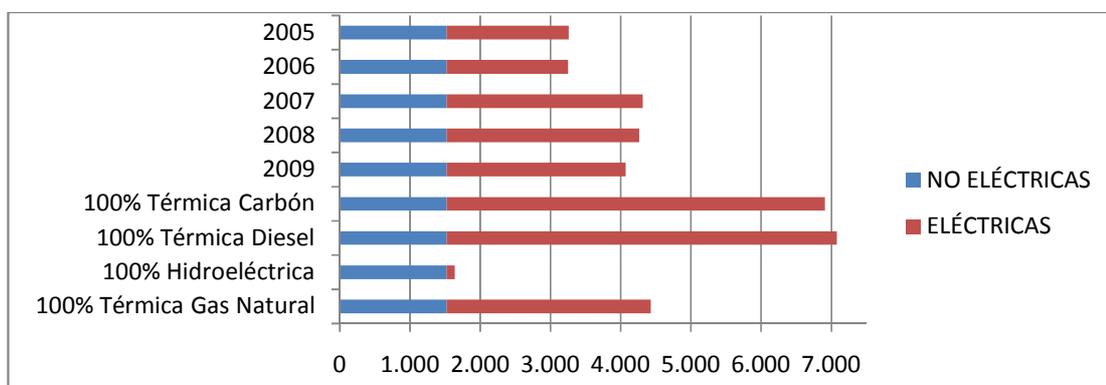


Figura D-6: Emisiones del Cátodo ER de Salvador, utilizando la expresión de emisiones unitarias del 2005 evaluada por la matriz eléctrica de cada año del período 2005-2009, en kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu <sup>238</sup>

<sup>237</sup> Elaboración propia a partir de la evaluación de la expresión de emisiones unitarias construida para este producto.

<sup>238</sup> Elaboración propia a partir de la evaluación de la expresión de emisiones unitarias construida para este producto.

## D.7 Cátodo EO de Salvador

- Emisiones unitarias no eléctricas: **868 kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu**
- Expresión para las emisiones unitarias, en kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu, año 2005 <sup>239</sup>:

$$E_u = 868,24 + 4.893,67 \times C + 5.046,48 \times D + 101,74 \times H + 2.641,07 \times G$$

Donde: **E<sub>u</sub>** = Emisiones unitarias, **C** = Porcentaje del SIC de Térmica a carbón, **D** = Porcentaje del SIC de Térmica a diesel, **H** = Porcentaje del SIC de Hidroeléctrica, **G** = Porcentaje del SIC de Térmica a gas natural.

Tabla D-7: Emisiones del Cátodo EO de Salvador, utilizando la expresión de emisiones unitarias del 2005 evaluada por la matriz eléctrica de cada año del período 2005-2009, en kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu <sup>240</sup>

<b>Emisiones No Eléctricas</b>	<b>868</b>	
<b>Año/Emisiones</b>	<b>Eléctricas</b>	<b>Total</b>
<b>2005</b>	<b>1.298</b>	<b>2.166</b>
<b>2006</b>	<b>1.237</b>	<b>2.105</b>
<b>2007</b>	<b>2.255</b>	<b>3.124</b>
<b>2008</b>	<b>2.164</b>	<b>3.033</b>
<b>2009</b>	<b>1.994</b>	<b>2.863</b>
<b>Promedio</b>	<b>1.790</b>	<b>2.658</b>
<b>100% Térmica Carbón</b>	<b>4.894</b>	<b>5.762</b>
<b>100% Térmica Diesel</b>	<b>5.046</b>	<b>5.915</b>
<b>100% Hidroeléctrica</b>	<b>102</b>	<b>970</b>
<b>100% Térmica Gas Natural</b>	<b>2.641</b>	<b>3.509</b>

<sup>239</sup> Expresión construida a partir de las emisiones unitarias provenientes de los combustibles, insumos y electricidad, y de los factores de emisión desarrollados por GaBi para Chile según tipo de fuente. Esta expresión mantiene fija las emisiones unitarias provenientes de los combustibles e insumos, y hace variar las emisiones unitarias del consumo eléctrico dependiendo de la composición de la matriz eléctrica.

<sup>240</sup> Elaboración propia a partir de la evaluación de la expresión de emisiones unitarias construida para este producto.

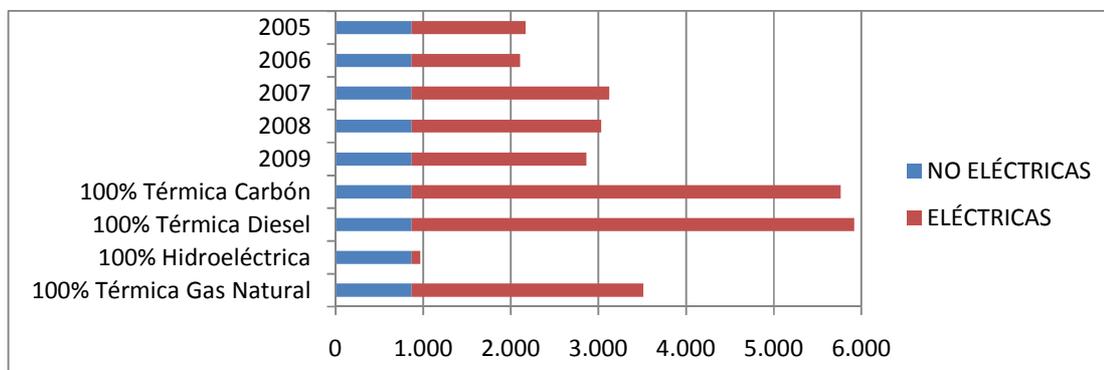


Figura D-7: Emisiones del Cátodo EO de Salvador, utilizando la expresión de emisiones unitarias del 2005 evaluada por la matriz eléctrica de cada año del período 2005-2009, en kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu <sup>241</sup>

## D.8 Concentrado de Cobre de Andina

- Emisiones unitarias no eléctricas: **570 kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu**
- Expresión para las emisiones unitarias, en kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu, año 2005 <sup>242</sup>:

$$E_u = 569,52 + 2.804,15 \times C + 2.891,71 \times D + 58,30 \times H + 1.513,37 \times G$$

Donde:  $E_u$  = Emisiones unitarias,  $C$  = Porcentaje del SIC de Térmica a carbón,  $D$  = Porcentaje del SIC de Térmica a diesel,  $H$  = Porcentaje del SIC de Hidroeléctrica,  $G$  = Porcentaje del SIC de Térmica a gas natural.

<sup>241</sup> Elaboración propia a partir de la evaluación de la expresión de emisiones unitarias construida para este producto.

<sup>242</sup> Expresión construida a partir de las emisiones unitarias provenientes de los combustibles, insumos y electricidad, y de los factores de emisión desarrollados por GaBi para Chile según tipo de fuente. Esta expresión mantiene fija las emisiones unitarias provenientes de los combustibles e insumos, y hace variar las emisiones unitarias del consumo eléctrico dependiendo de la composición de la matriz eléctrica.

Tabla D-8: Emisiones del Concentrado de Cobre de Andina, utilizando la expresión de emisiones unitarias del 2005 evaluada por la matriz eléctrica de cada año del período 2005-2009, en kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu <sup>243</sup>

<b>Emisiones No Eléctricas</b>	<b>570</b>	
<b>Año/Emisiones</b>	<b>Eléctricas</b>	<b>Total</b>
<b>2005</b>	<b>744</b>	<b>1.313</b>
<b>2006</b>	<b>709</b>	<b>1.278</b>
<b>2007</b>	<b>1.292</b>	<b>1.862</b>
<b>2008</b>	<b>1.240</b>	<b>1.810</b>
<b>2009</b>	<b>1.143</b>	<b>1.712</b>
<b>Promedio</b>	<b>1.026</b>	<b>1.595</b>
<b>100% Térmica Carbón</b>	<b>2.804</b>	<b>3.374</b>
<b>100% Térmica Diesel</b>	<b>2.892</b>	<b>3.461</b>
<b>100% Hidroeléctrica</b>	<b>58</b>	<b>628</b>
<b>100% Térmica Gas Natural</b>	<b>1.513</b>	<b>2.083</b>

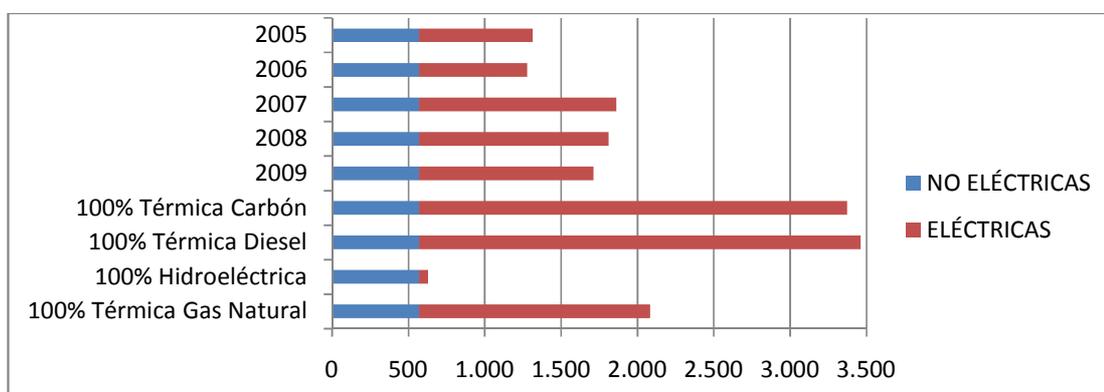


Figura D-8: Emisiones del Concentrado de Cobre de Andina, utilizando la expresión de emisiones unitarias del 2005 evaluada por la matriz eléctrica de cada año del período 2005-2009, en kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu <sup>244</sup>

<sup>243</sup> Elaboración propia a partir de la evaluación de la expresión de emisiones unitarias construida para este producto.

<sup>244</sup> Elaboración propia a partir de la evaluación de la expresión de emisiones unitarias construida para este producto.

## D.9 Concentrado de Cobre de El Teniente

- Emisiones unitarias no eléctricas: **344 kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu**
- Expresión para las emisiones unitarias, en kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu, año 2005 <sup>245</sup>:

$$E_u = 343,69 + 3.601,73 \times C + 3.714,19 \times D + 74,88 \times H + 1.943,82 \times G$$

Donde:  $E_u$  = Emisiones unitarias,  $C$  = Porcentaje del SIC de Térmica a carbón,  $D$  = Porcentaje del SIC de Térmica a diesel,  $H$  = Porcentaje del SIC de Hidroeléctrica,  $G$  = Porcentaje del SIC de Térmica a gas natural.

Tabla D-9: Emisiones del Concentrado de Cobre de El Teniente, utilizando la expresión de emisiones unitarias del 2005 evaluada por la matriz eléctrica de cada año del período 2005-2009, en kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu <sup>246</sup>

<b>Emisiones No Eléctricas</b>	<b>344</b>	
<b>Año/Emisiones</b>	<b>Eléctricas</b>	<b>Total</b>
<b>2005</b>	<b>955</b>	<b>1.299</b>
<b>2006</b>	<b>910</b>	<b>1.254</b>
<b>2007</b>	<b>1.660</b>	<b>2.004</b>
<b>2008</b>	<b>1.593</b>	<b>1.937</b>
<b>2009</b>	<b>1.468</b>	<b>1.811</b>
<b>Promedio</b>	<b>1.317</b>	<b>1.661</b>
<b>100% Térmica Carbón</b>	<b>3.602</b>	<b>3.945</b>
<b>100% Térmica Diesel</b>	<b>3.714</b>	<b>4.058</b>
<b>100% Hidroeléctrica</b>	<b>75</b>	<b>419</b>
<b>100% Térmica Gas Natural</b>	<b>1.944</b>	<b>2.288</b>

<sup>245</sup> Expresión construida a partir de las emisiones unitarias provenientes de los combustibles, insumos y electricidad, y de los factores de emisión desarrollados por GaBi para Chile según tipo de fuente. Esta expresión mantiene fija las emisiones unitarias provenientes de los combustibles e insumos, y hace variar las emisiones unitarias del consumo eléctrico dependiendo de la composición de la matriz eléctrica.

<sup>246</sup> Elaboración propia a partir de la evaluación de la expresión de emisiones unitarias construida para este producto.

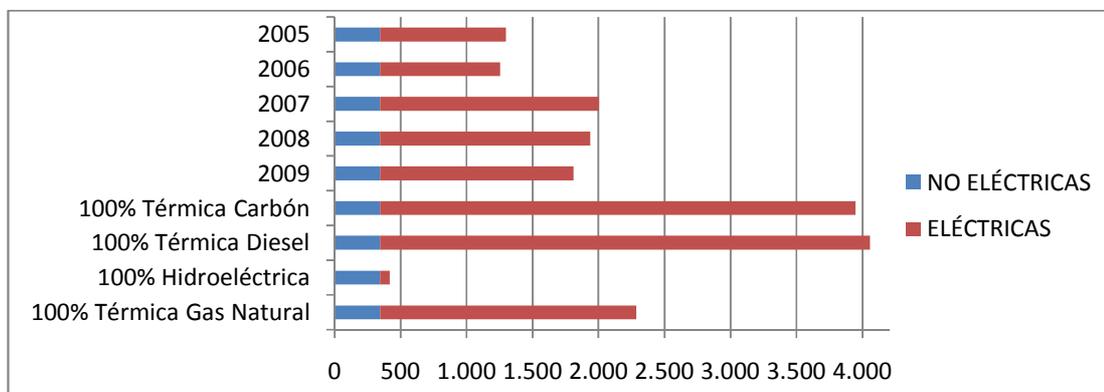


Figura D-9: Emisiones del Concentrado de Cobre de El Teniente, utilizando la expresión de emisiones unitarias del 2005 evaluada por la matriz eléctrica de cada año del período 2005-2009, en kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu <sup>247</sup>

#### D.10 Cátodo ER de El Teniente/Ventanas

- Emisiones unitarias no eléctricas: **981 kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu**
- Expresión para las emisiones unitarias, en kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu, año 2005 <sup>248</sup>:

$$E_u = 980,71 + 5.666,41 \times C + 5.843,35 \times D + 117,81 \times H + 3.058,10 \times G$$

Donde:  $E_u$  = Emisiones unitarias,  $C$  = Porcentaje del SIC de Térmica a carbón,  $D$  = Porcentaje del SIC de Térmica a diesel,  $H$  = Porcentaje del SIC de Hidroeléctrica,  $G$  = Porcentaje del SIC de Térmica a gas natural.

<sup>247</sup> Elaboración propia a partir de la evaluación de la expresión de emisiones unitarias construida para este producto.

<sup>248</sup> Expresión construida a partir de las emisiones unitarias provenientes de los combustibles, insumos y electricidad, y de los factores de emisión desarrollados por GaBi para Chile según tipo de fuente. Esta expresión mantiene fija las emisiones unitarias provenientes de los combustibles e insumos, y hace variar las emisiones unitarias del consumo eléctrico dependiendo de la composición de la matriz eléctrica.

Tabla D-10: Emisiones del Cátodo ER de El Teniente/Ventanas, utilizando la expresión de emisiones unitarias del 2005 evaluada por la matriz eléctrica de cada año del período 2005-2009, en kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu <sup>249</sup>

Emisiones No Eléctricas		981	
Año/Emisiones	Eléctricas	Total	
2005	1.503	2.484	
2006	1.432	2.413	
2007	2.611	3.592	
2008	2.506	3.487	
2009	2.309	3.290	
Promedio	2.072	3.053	
100% Térmica Carbón	5.666	6.647	
100% Térmica Diesel	5.843	6.824	
100% Hidroeléctrica	118	1.099	
100% Térmica Gas Natural	3.058	4.039	

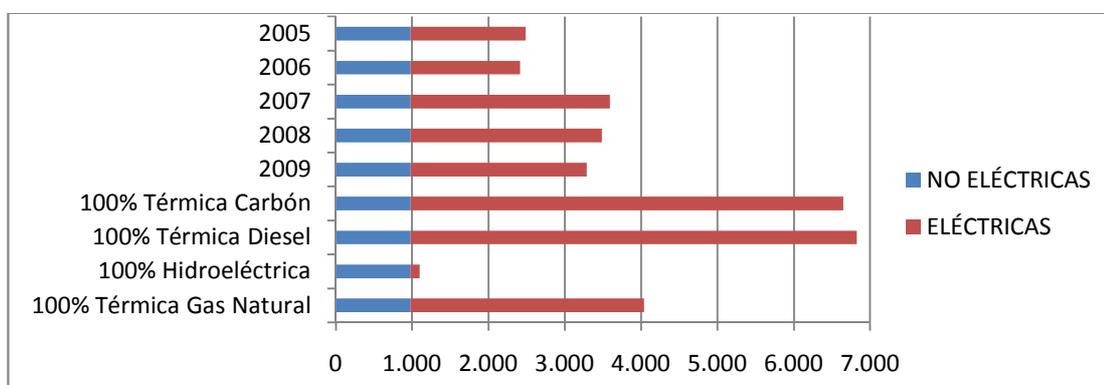


Figura D-10: Emisiones del Cátodo ER de El Teniente/Ventanas, utilizando la expresión de emisiones unitarias del 2005 evaluada por la matriz eléctrica de cada año del período 2005-2009, en kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu <sup>250</sup>

<sup>249</sup> Elaboración propia a partir de la evaluación de la expresión de emisiones unitarias construida para este producto.

<sup>250</sup> Elaboración propia a partir de la evaluación de la expresión de emisiones unitarias construida para este producto.

### D.11 RAF de El Teniente

- Emisiones unitarias no eléctricas: **880 kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu**
- Expresión para las emisiones unitarias, en kg CO<sub>2</sub>-eq/TMF Cu, año 2005 <sup>251</sup>:

$$E_u = 879,93 + 5.186,34 \times C + 5.348,29 \times D + 107,82 \times H + 2.799,02 \times G$$

Donde:  $E_u$  = Emisiones unitarias,  $C$  = Porcentaje del SIC de Térmica a carbón,  $D$  = Porcentaje del SIC de Térmica a diesel,  $H$  = Porcentaje del SIC de Hidroeléctrica,  $G$  = Porcentaje del SIC de Térmica a gas natural.

Tabla D-11: Emisiones del RAF de El Teniente, utilizando la expresión de emisiones unitarias del 2005 evaluada por la matriz eléctrica de cada año del período 2005-2009, en kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu <sup>252</sup>

<b>Emisiones No Eléctricas</b>	<b>880</b>	
<b>Año/Emisiones</b>	<b>Eléctricas</b>	<b>Total</b>
<b>2005</b>	<b>1.376</b>	<b>2.255</b>
<b>2006</b>	<b>1.311</b>	<b>2.191</b>
<b>2007</b>	<b>2.390</b>	<b>3.270</b>
<b>2008</b>	<b>2.294</b>	<b>3.174</b>
<b>2009</b>	<b>2.114</b>	<b>2.993</b>
<b>Promedio</b>	<b>1.897</b>	<b>2.777</b>
<b>100% Térmica Carbón</b>	<b>5.186</b>	<b>6.066</b>
<b>100% Térmica Diesel</b>	<b>5.348</b>	<b>6.228</b>
<b>100% Hidroeléctrica</b>	<b>108</b>	<b>988</b>
<b>100% Térmica Gas Natural</b>	<b>2.799</b>	<b>3.679</b>

<sup>251</sup> Expresión construida a partir de las emisiones unitarias provenientes de los combustibles, insumos y electricidad, y de los factores de emisión desarrollados por GaBi para Chile según tipo de fuente. Esta expresión mantiene fija las emisiones unitarias provenientes de los combustibles e insumos, y hace variar las emisiones unitarias del consumo eléctrico dependiendo de la composición de la matriz eléctrica.

<sup>252</sup> Elaboración propia a partir de la evaluación de la expresión de emisiones unitarias construida para este producto.

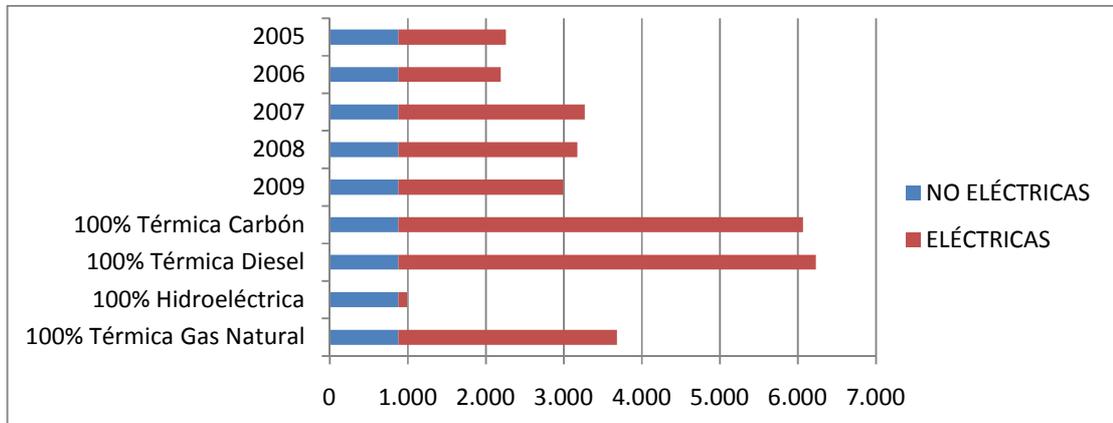


Figura D-11: Emisiones del RAF de El Teniente, utilizando la expresión de emisiones unitarias del 2005 evaluada por la matriz eléctrica de cada año del período 2005-2009, en kg CO<sub>2</sub>e/TMF Cu <sup>253</sup>

<sup>253</sup> Elaboración propia a partir de la evaluación de la expresión de emisiones unitarias construida para este producto.

## **E. DETALLE DE CONSUMOS ENERGÉTICOS CONSIDERADOS PARA DESAGREGAMIENTO DE HIDROMETALURGIA**

Las tablas de esta sección de los Anexos muestran los consumos energéticos considerados de la base de datos proporcionada por Codelco para los consumos totales de energía adjudicados para cada subproceso. A partir de estos consumos totales de energía fue posible conocer las emisiones de GEI desagregadas para cada subproceso.

Como se vio, las hidrometalurgias cuyos consumos energéticos son desagregados en esta Tesis son las de Chuquicamata y Radomiro Tomic.

### **E.1 Hidrometalurgia de Chuquicamata**

#### **E.1.1 Consumos energéticos en Lixiviación**

Tabla E-1: Detalle de consumos energéticos considerados para la Lixiviación en Hidrometalurgia de Chuquicamata de la Empresa, en MWh <sup>254</sup>

	<b>DESCRIPCIÓN CONSUMO</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>	<b>2009</b>
<b>GAS LIC.</b>	Lixiviación Proy. Trat Minerales Pila		96	85	111
	Unidad Mantenimiento Mecánico Área Seca	75	96	85	86
	Unidad Mantenimiento Mecánico Área Húmeda				23
	Unidad Mantenimiento Eléctrico		20	9	
	BLOQ. Excavación Transp Ripios Frescos	10			
	<b>TOTAL GAS LICUADO</b>	<b>84</b>	<b>212</b>	<b>179</b>	<b>220</b>

<sup>254</sup> Elaboración propia a partir de datos proporcionados por Codelco.

DIESEL	Lixiviación Polvos Horno Flash	8			
	Plantas Lixiviación Botaderos	743	87	14	22
	Lixiviación Proy Trat. Minerales Pila	42	96	276	337
	Lixiviación Parcelas S.B.L.	532	3.954	2.446	4.176
	Unidad Mantenimiento Mecánico Área Seca	433	269	285	340
	Unidad Mantenimiento Mecánico Área Húmeda	89	88	80	98
	Unidad Mantenimiento Eléctrico	186	171	191	208
	Guardia Eléctrica		1	0	
	Guardias Mecánicos	111	68	71	100
	U. Mantenimiento Mecánica Lixiv. S.B.L.		63	28	70
	BLOQ. Plantas Lixiviación Bateas	81	3		
	BLOQ. Excavación Transp Rípios Frescos	31.823	3		
<b>TOTAL DIESEL</b>	<b>34.048</b>	<b>4.803</b>	<b>3.392</b>	<b>5.350</b>	
GASOLINA	Suptcia. Gral. Operaciones Sur	4			
	Lixiviación Polvos Horno Flash	1			
	Plantas Lixiviación Botaderos	3			
	Lixiviación Proy. Trat. Minerales Pila	28	8		
	Lixiviación Parcelas S.B.L.	1	2		
	Unidad Mantenimiento Mecánico Área Seca	5	3	1	
	Unidad Mantenimiento Mecánico Área	1			
	Unidad Mantenimiento Eléctrico	8	14	0	
	Guardia Eléctrica	0			
	Guardias Mecánicos	7	1		
	U. Mantenimiento Mecánica Lixiv. S.B.L.		4		
BLOQ. Plantas Lixiviación Bateas	0				
<b>TOTAL GASOLINA</b>	<b>58</b>	<b>31</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	
ELECTRICIDAD	Lixiviación Polvos Horno Flash	778	411		
	Plantas Lixiviación Botaderos	23.844	25.479	26.203	
	Lixiviación Proy. Trat. Minerales Pila	21.265	28.020	25.107	53.411
	Lixiviación Parcelas S.B.L.	13.108	13.224	13.471	12.201
	BLOQ. Plantas Lixiviación Bateas	6.737			
	BLOQ. Excavación Transp Rípios Frescos	448			
<b>TOTAL ELECTRICIDAD</b>	<b>66.180</b>	<b>67.133</b>	<b>64.781</b>	<b>65.613</b>	

Tabla E-2: Resumen Consumos Energéticos en la Lixiviación, Hidrometalurgia de Chuquicamata, en MWh <sup>255</sup>

Tipo de energía	2006	2007	2008	2009
<b>Gas Licuado</b>	84	212	179	220
<b>Diesel</b>	34.048	4.803	3.392	5.350
<b>Gasolina</b>	58	31	1	0
<b>TOTAL COMBUSTIBLES</b>	<b>34.190</b>	<b>5.046</b>	<b>3.573</b>	<b>5.571</b>
<b>Electricidad</b>	<b>66.180</b>	<b>67.133</b>	<b>64.781</b>	<b>65.613</b>
<b>TOTAL ENERGÍA</b>	<b>100.370</b>	<b>72.179</b>	<b>68.354</b>	<b>71.183</b>

### E.1.2 Consumos energéticos en Extracción por Solventes

Tabla E-3: Detalle de consumos energéticos considerados para la Extracción por Solventes en Hidrometalurgia de Chuquicamata de la Empresa, en MWh <sup>256</sup>

	DESCRIPCIÓN CONSUMO	2006	2007	2008	2009
DIE SEL	Planta Extracción por Solventes	28	22	30	30
	Extracción por Solventes S.B.L.		1	3	
	<b>TOTAL DIESEL</b>	<b>28</b>	<b>23</b>	<b>34</b>	<b>30</b>
GAS LIC.	Planta Extracción por Solventes	0			
	<b>TOTAL GAS LICUADO</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
ELE C.	Planta Extracción por Solventes	6.963	6.841	6.669	6.412
	Extracción por Solventes S.B.L.	6.553	6.611	6.734	6.150
	<b>TOTAL ELECTRICIDAD</b>	<b>13.516</b>	<b>13.452</b>	<b>13.403</b>	<b>12.562</b>

<sup>255</sup> Elaboración propia a partir de datos proporcionados por Codelco.

<sup>256</sup> Elaboración propia a partir de datos proporcionados por Codelco.

Tabla E-4: Resumen Consumos Energéticos en la Extracción por Solventes,  
Hidrometalurgia de Chuquicamata, en MWh <sup>257</sup>

Tipo de energía	2006	2007	2008	2009
<b>Diesel</b>	28	23	34	30
<b>Gasolina</b>	0	0	0	0
<b>TOTAL COMBUSTIBLES</b>	<b>29</b>	<b>23</b>	<b>34</b>	<b>30</b>
<b>Electricidad</b>	<b>13.516</b>	<b>13.452</b>	<b>13.403</b>	<b>12.562</b>
<b>TOTAL ENERGÍA</b>	<b>13.545</b>	<b>13.475</b>	<b>13.436</b>	<b>12.592</b>

### E.1.3 Consumos energéticos en Electro Obtención

Tabla E-5: Detalle de consumos energéticos considerados para la Electro Obtención en  
Hidrometalurgia de Chuquicamata de la Empresa, en MWh <sup>258</sup>

	DESCRIPCIÓN CONSUMO	2006	2007	2008	2009
Gas Licuado	Electro-Obtención S.B.L.		6	4	1
	<b>TOTAL GAS LICUADO</b>	<b>0</b>	<b>6</b>	<b>4</b>	<b>1</b>
DIESEL	Planta Electrodeposición	237	300	302	299
	Fabricación de Láminas Iniciales		21	16	5
	Patio de Embarque SX - EW	85	327	416	373
	Electro-Obtención S.B.L.	10.347	19.516	16.690	18.461
	<b>TOTAL DIESEL</b>	<b>10.669</b>	<b>20.163</b>	<b>17.424</b>	<b>19.138</b>
GAS OLIN	Planta Electrodeposición	9	1		
	<b>TOTAL GASOLINA</b>	<b>9</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
Gas Natural	Electro-Obtención S.B.L.	9.789	1.891	0	0
	<b>TOTAL GAS NATURAL</b>	<b>9.789</b>	<b>1.891</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

<sup>257</sup> Elaboración propia a partir de datos proporcionados por Codelco.

<sup>258</sup> Elaboración propia a partir de datos proporcionados por Codelco.

ELECTR	Planta Electrodeposición	270.812	268.094	263.766	257.257
	Fabricación de Láminas Iniciales		0	3.218	5.742
	Electro-Obtención S.B.L.	53.227	53.697	54.718	49.500
	<b>TOTAL ELECTRICIDAD</b>	<b>324.039</b>	<b>321.792</b>	<b>321.702</b>	<b>312.499</b>

Tabla E-6: Resumen Consumos Energéticos en la Electro Obtención, Hidrometalurgia de Chuquicamata, en MWh <sup>259</sup>

Tipo de energía	2006	2007	2008	2009
Gas licuado	0	6	4	1
Diesel	10.669	20.163	17.424	19.138
Gasolina	9	1	0	0
Gas Natural	9.789	1.891	0	0
<b>TOTAL COMBUSTIBLES</b>	<b>20.467</b>	<b>22.061</b>	<b>17.428</b>	<b>19.139</b>
Electricidad	<b>324.039</b>	<b>321.792</b>	<b>321.702</b>	<b>312.499</b>
<b>TOTAL ENERGÍA</b>	<b>344.506</b>	<b>343.852</b>	<b>339.130</b>	<b>331.638</b>

<sup>259</sup> Elaboración propia a partir de datos proporcionados por Codelco.

## E.2 Hidrometalurgia de Radomiro Tomic

### E.2.1 Consumos energéticos en Lixiviación

Tabla E-7: Detalle de consumos energéticos considerados para la Lixiviación en Hidrometalurgia de Radomiro Tomic de la Empresa, en MWh <sup>260</sup>

	DESCRIPCIÓN CONSUMO	2006	2007	2008	2009
DIESEL	Suptcia. LX - SX	25	410	2.698	602
	Lixiviación de Mineral	6.103	6.421	1.987	538
	Lixiviación de Ripios	123		20	1
	Lixiviación Óxidos de Baja Ley	9			
	Ingeniería Mantenición y Plan Mec A. Seca	109	162	81	92
	Mantenición Mecánica LX-SX	41	123	274	50
	Mantenición Eléctrica LX-SX	8	141	10	42
	<b>TOTAL DIESEL</b>	<b>6.418</b>	<b>7.257</b>	<b>5.070</b>	<b>1.326</b>
GASOLINA	Suptcia. LX - SX	0			
	Lixiviación de Mineral	9	0		
	<b>TOTAL GASOLINA</b>	<b>10</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
ELECTRICIDAD	Lixiviación de Mineral	27.966	25.655	26.009	26.254
	Lixiviación de Ripios	13.624	14.566	14.828	11.346
	<b>TOTAL ELECTRICIDAD</b>	<b>41.590</b>	<b>40.221</b>	<b>40.837</b>	<b>37.600</b>

<sup>260</sup> Elaboración propia a partir de datos proporcionados por Codelco.

Tabla E-8: Resumen Consumos Energéticos en la Lixiviación, Hidrometalurgia de Radomiro Tomic, en MWh <sup>261</sup>

Tipo de energía	2006	2007	2008	2009
<b>Diesel</b>	6.418	7.257	5.070	1.326
<b>Gasolina</b>	10	0	0	0
<b>TOTAL COMBUSTIBLES</b>	<b>6.427</b>	<b>7.257</b>	<b>5.070</b>	<b>1.326</b>
<b>Electricidad</b>	<b>41.590</b>	<b>40.221</b>	<b>40.837</b>	<b>37.600</b>
<b>TOTAL ENERGÍA</b>	<b>48.017</b>	<b>47.478</b>	<b>45.907</b>	<b>38.926</b>

## E.2.2 Consumos energéticos en Extracción por Solventes

Tabla E-9: Detalle de consumos energéticos considerados para la Extracción por Solventes en Hidrometalurgia de Radomiro Tomic de la Empresa, en MWh <sup>262</sup>

	DESCRIPCIÓN CONSUMO	2006	2007	2008	2009
DIESEL	Extracción por Solventes	6	3	27	226
	<b>TOTAL DIESEL</b>	<b>6</b>	<b>3</b>	<b>27</b>	<b>226</b>
ELECTR	Extracción por Solventes	32.593	30.793	29.609	30.540
	<b>TOTAL ELECTRICIDAD</b>	<b>32.593</b>	<b>30.793</b>	<b>29.609</b>	<b>30.540</b>

<sup>261</sup> Elaboración propia a partir de datos proporcionados por Codelco.

<sup>262</sup> Elaboración propia a partir de datos proporcionados por Codelco.

Tabla E-10: Resumen Consumos Energéticos en la Extracción por Solventes,  
Hidrometalurgia de Radomiro Tomic, en MWh <sup>263</sup>

Tipo de energía	2006	2007	2008	2009
Diesel	6	3	27	226
<b>TOTAL COMBUSTIBLES</b>	<b>6</b>	<b>3</b>	<b>27</b>	<b>226</b>
Electricidad	32.593	30.793	29.609	30.540
<b>TOTAL ENERGÍA</b>	<b>32.599</b>	<b>30.796</b>	<b>29.636</b>	<b>30.766</b>

### E.2.3 Consumos energéticos en Electro Obtención

Tabla E-11: Detalle de consumos energéticos considerados para la Electro Obtención en  
Hidrometalurgia de Radomiro Tomic de la Empresa, en MWh <sup>264</sup>

	DESCRIPCIÓN CONSUMO	2006	2007	2008	2009
DIESEL	Electroobtención	36.766	137.537	155.063	84.512
	Ex DRT Patio de Embarque EW	3.059	2.544	2.635	3.114
	Costos de Tratamiento de Cátodos CCC-RT	0			
	Mantenimiento Mecánica EW	32	46	33	37
	Mantenimiento Eléctrica EW	88	114	58	66
	Mantenimiento Instrumentación EW				1
	<b>TOTAL DIESEL</b>	<b>39.945</b>	<b>140.242</b>	<b>157.789</b>	<b>87.729</b>
GASOLINA	Electroobtención	0			
	Mantenimiento Mecánica EW	0			
	Mantenimiento Eléctrica EW	1			
	<b>TOTAL GASOLINA</b>	<b>2</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
GZ	Electroobtención	102.354	56.603	5.733	62.911

<sup>263</sup> Elaboración propia a partir de datos proporcionados por Codelco.

<sup>264</sup> Elaboración propia a partir de datos proporcionados por Codelco.

	<b>TOTAL GAS NATURAL</b>	<b>102.354</b>	<b>56.603</b>	<b>5.733</b>	<b>62.911</b>
ELECTRIC	Planta de Osmosis	3.408	3.062	3.085	3.367
	Electroobtención	604.598	537.431	535.288	597.314
	Ex DRT Patio de Embarque EW	1.877	1.562	1.502	1.640
	<b>TOTAL ELECTRICIDAD</b>	<b>609.883</b>	<b>542.055</b>	<b>539.875</b>	<b>602.322</b>

Tabla E-12: Resumen Consumos Energéticos en la Electro Obtención, Hidrometalurgia de Radomiro Tomic, en MWh <sup>265</sup>

Tipo de energía	2006	2007	2008	2009
<b>Diesel</b>	39.945	140.242	157.789	87.729
<b>Gasolina</b>	2	0	0	0
<b>Gas Natural</b>	102.354	56.603	5.733	62.911
<b>TOTAL COMBUSTIBLES</b>	<b>142.302</b>	<b>196.845</b>	<b>163.522</b>	<b>150.640</b>
<b>Electricidad</b>	<b>609.883</b>	<b>542.055</b>	<b>539.875</b>	<b>602.322</b>
<b>TOTAL ENERGÍA</b>	<b>752.185</b>	<b>738.900</b>	<b>703.397</b>	<b>752.961</b>

<sup>265</sup> Elaboración propia a partir de datos proporcionados por Codelco.

## F. DETALLE DE CONSUMOS ENERGÉTICOS CONSIDERADOS PARA LA TOSTADORA DE CHUQUICAMATA

A continuación se presentan los consumos considerados para la Tostadora de Chuquicamata, para los 4 años comprendidos entre el período 2006 y 2009.

Tabla F-1: Consumos de la Tostadora de Chuquicamata, año 2006 <sup>266</sup>

ENERGÍA	Cantidad consumida	Energía equivalente (TJ)
Gas licuado	17,48 M3	0,49
Petróleo Diesel	95,41 M3	3,66
Kerosene	1.016,54 M3	38,24
Gasolina	0,37 M3	0,01
Energía Eléctrica	4.290,42 MWh	15,45

Tabla F-2: Consumos de la Tostadora de Chuquicamata, año 2007 <sup>267</sup>

ENERGÍA	Cantidad consumida	Energía equivalente (TJ)
Gas licuado	25,99 M3	0,72
Petróleo Diesel	126,39 M3	4,84
Kerosene	721,80 M3	27,15
Gasolina	0,17 M3	0,01
Energía Eléctrica	7.261,15 MWh	26,14

---

<sup>266</sup> Elaboración propia a partir de datos proporcionados por Codelco.

<sup>267</sup> Elaboración propia a partir de datos proporcionados por Codelco.

Tabla F-3: Consumos de la Tostadora de Chuquicamata, año 2008 <sup>268</sup>

<b>ENERGÍA</b>	<b>Cantidad consumida</b>	<b>Energía equivalente (TJ)</b>
<b>Gas licuado</b>	28,36 M3	0,79
<b>Petróleo Diesel</b>	15,50 M3	0,59
<b>Kerosene</b>	851,19 M3	32,02
<b>Gasolina</b>	0,11 M3	0,00
<b>Energía Eléctrica</b>	4.062,24 MWh	14,62

Tabla F-4: Consumos de la Tostadora de Chuquicamata, año 2009 <sup>269</sup>

<b>ENERGÍA</b>	<b>Cantidad consumida</b>	<b>Energía equivalente (TJ)</b>
<b>Gas licuado</b>	27,38 M3	0,76
<b>Petróleo Diesel</b>	1,62 M3	0,06
<b>Kerosene</b>	794,64 M3	29,89
<b>Gasolina</b>	--	--
<b>Energía Eléctrica</b>	3.510,25 MWh	12,64

---

<sup>268</sup> Elaboración propia a partir de datos proporcionados por Codelco.

<sup>269</sup> Elaboración propia a partir de datos proporcionados por Codelco.