



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

EFEECTO DE LA LEY DEL MINERAL EN EL CONSUMO DE ENERGÍA Y AGUA, Y LAS EMISIONES GEI EN LA MINERÍA DEL COBRE

JAVIER IGNACIO CEJAS ALDUNATE

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

Profesor Supervisor:
GUSTAVO LAGOS CRUZ-COKE

Santiago de Chile, Octubre, 2018

© 2018, Javier Ignacio Cejas Aldunate



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

EFFECTO DE LA LEY DEL MINERAL EN EL CONSUMO DE ENERGÍA Y AGUA, Y LAS EMISIONES GEI EN LA MINERÍA DEL COBRE

JAVIER IGNACIO CEJAS ALDUNATE

Tesis presentada a la Comisión integrada por los profesores:

GUSTAVO LAGOS

JUAN CARLOS SALAS

JORGE LAGOS

FRANCO PEDRESCHI

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

Santiago de Chile, Octubre, 2018

A mi Madre, Macarena y amigos, por
su apoyo incondicional.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer al profesor Gustavo Lagos por su constante apoyo al desarrollo de esta tesis, así como por la motivación entregada y la gestión realizada para poder cumplir mis objetivos.

Quiero agradecer también, a Macarena Cubillos por su ayuda en el proceso de traducción del artículo, también agradezco al Departamento de Minería por las facilidades y espacios otorgados.

INDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
INDICE DE TABLAS	vi
INDICE DE FIGURAS.....	vii
RESUMEN.....	viii
ABSTRACT	ix
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS	4
2.1 Objetivo General	4
2.2 Objetivos Específicos.....	4
3. METODOLOGÍA.....	5
4. RESULTADOS	9
4.1 Consumo de Energía	9
4.2 Consumo de Agua	15
4.3 Emisiones GEI de alcances uno y dos.....	18
4.4 Emisiones de alcance tres y <i>LCIA</i>	20
5. CONCLUSIONES.....	25
BIBLIOGRAFIA	27
A N E X O S	34

Anexo A : Artículo enviado a JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION “The effect of ore grade on energy and water consumption, and GHG emissions in copper mining.”	35
Anexo B : Complete Data Base	61
Anexo C : Energetic Composition per Year	63

INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 3-1: Valores promedio por faena de distintos indicadores de eficiencia	5
Tabla 4-1: Inputs relevantes para la producción de una tonelada de cobre a 2016 con mineral de ley 0.6%.....	21
Tabla 4-2: Factores de emisión (alcance 3) para principales insumos por tonelada de cobre contenida en concentrado según modelamiento en GaBi 8.....	22
Tabla 4-3: Energía y emisiones GEI por tonelada de cobre por alcance para ley media estudiada.....	22
Tabla 4-4: Energía del proceso (directa + indirecta) por operación unitaria por tonelada de cobre para ley de 0.9%	23
Tabla 4-5: Resultados LCIA por tonelada de cobre para ley de 0.6%	24

INDICE DE FIGURAS

Pág.

Figura 4-1: Consumo unitario de energía directa vs ley de cabeza.....	11
Figura 4-2: Consumo unitario de energía indirecta vs ley de cabeza	12
Figura 4-3: Comparación modelos de Northey et al. (2013) y de este trabajo respecto a la data actual.....	14
Figura 4-4: Consumo de agua captada por tonelada de cobre producido versus ley de cabeza.....	17
Figura 4-5: Emisiones GEI de alcances 1 (izquierda) y 2 (derecha) por tonelada de cobre producido versus ley de cabeza.....	20

RESUMEN

Numerosas investigaciones sostienen que la ley promedio de cobre en los yacimientos en explotación de dicho metal a nivel global se ha ido reduciendo en el tiempo y que esta tendencia continuará. Ello constituye un factor clave en el aumento de la huella ambiental cuando esta se mide en términos del consumo de agua, de energía y de emisiones de gases efecto invernadero. En 2015, el 81% del total de la producción de cobre refinado de mina a nivel mundial se obtuvo en plantas concentradoras, cuya alimentación son minerales en base a sulfuros, y cuyo producto son los concentrados de cobre. Estos contienen una ley de cobre aproximadamente 30 veces superior a la roca mineralizada que ingresa a las plantas concentradoras. En este artículo se desarrollan modelos para estimar el consumo energético y de agua, al igual que las emisiones de GEI, en función de la ley de cobre del material que ingresó a las plantas concentradoras de diez minas chilenas explotadas a cielo abierto, que representaron el 67% de la producción de Chile en 2016. Los modelos desarrollados incluyen los alcances uno, dos y tres de un análisis de ciclo de vida.

Palabras Claves: Emisiones GEI, Energía, Agua, Huella Ambiental, Ley de cobre, ACV.

ABSTRACT

Numerous investigations support that average copper grade in operating deposits of this metal has been reducing globally over the time and this trend will continue. This is a key factor in the increase of the environmental footprint when it is measured in terms of water withdrawal, energy consumption and greenhouse gas emissions. In 2015, 81% of total mine copper global production was obtained in concentrator plants whose feeding is based on sulfides and which product is copper concentrates. These contain a copper grade approximately thirty times higher than the mineralized rock that enters the concentrator plants. In this paper, models are developed to estimate energy and water consumption as well as GHG emissions based on the copper grade of the ore that entered the concentration plants of ten Chilean open-pit mines, which represented the 67% of Chile's production on 2016. The developed models include scopes one, two and three of an LCA.

Keywords: GHG emissions, Energy, Water, Environmental footprint, Copper ore grade, LCA.

1. INTRODUCCIÓN

Las empresas mineras están constantemente obligadas a mejorar la eficiencia de extracción de los recursos y a reducir la huella ambiental (Norgate, Jahanshahi & Rankin, 2007), sobre todo porque se enfrentan al deterioro de factores naturales con el tiempo, tales como la reducción de la ley de los metales en los yacimientos, y otros factores (Crowson, 2012; Lagos, Peters, Videla & Jara, 2018). Una forma de realizar un diagnóstico cuantitativo de este problema es mediante el análisis de ciclo de vida (LCA), el que permite identificar las mejores oportunidades para reducir los impactos ambientales que conforman dicha huella (Northey, Haque & Mudd, 2013).

La reducción de la ley de cobre implica minar y procesar mayor cantidad de mineral para obtener la misma cantidad de metal, aumentado, por ello, los costos de procesamiento (Calvo, Mudd, Valero & Valero, 2016). La disminución de las leyes de metal es uno de los principales factores que influyen en el impacto ambiental de la producción de cobre (Norgate et al., 2007). Algunos de estos factores son la remoción de mayor cantidad de material estéril, mayor generación y deposición de relaves, perturbación prolongada del sector aledaño a la faena, aumento del consumo de energía eléctrica, explosivos, diésel, agua y otros insumos (Northey, Mohr, Mudd, Weng, & Giurco, 2014).

La relación de la ley de cobre con el consumo energético, las emisiones de gases de efecto invernadero, GEI, y/o el consumo de agua fresca fue estudiada por varios autores (Norgate & Haque, 2010; Northey et al., 2013; Northey et al., 2014; Calvo et al., 2016; Elshkaki, Graedel, Ciacchi & Reck, 2016). Estas variables se consideran claves en la huella ambiental por distintos motivos. Primero, las emisiones GEI son de importancia global y la

metodología para medirlas está bien establecida (GRI, 2016b). La energía cuenta también con metodologías universales de medición y es de importancia global cuando es producida mediante la combustión de combustibles fósiles (GRI, 2016a). Y el agua es una variable de importancia local primordial debido a su escasez creciente, pero también debido a su manejo, tratamiento, recirculación y disposición en la mayor parte del planeta (U.S. Geological Survey, 2012).

La explotación de minerales de cobre puede realizarse mediante métodos subterráneos o a cielo abierto. Los métodos a cielo abierto son la manera de minar el mineral predominante en todo el mundo (ICSG, 2016), según European Copper Institute (2018), cerca de un 90% del mineral es minado mediante métodos a cielo abierto. De hecho, en 2015, la minería a cielo abierto aportó el 86% de la producción chilena (Lagos et al., 2018), siendo Chile el principal productor de cobre mina con un 29.9% de la producción mundial en el mismo año (Cochilco, 2017a).

Luego del minado, destacan dos líneas principales de procesamiento: la hidrometalurgia, compuesta por lixiviación, extracción por solvente y electroobtención, generalmente utilizada para el tratamiento de minerales oxidados, y el proceso tradicional compuesto por conminución y concentración seguidas por fundición y refinación electrolítica (Northey et al., 2013) mayormente utilizada para procesar sulfuros de cobre. Esta última línea de procesamiento representó un 81% de la producción mundial en 2015 (ICSG, 2016).

Finalmente, dada la importancia en la producción mundial de los minerales de sulfuro de cobre y que una vez que el mineral es concentrado, las emisiones de los procesos aguas

abajo no se ven afectados por la ley original del mineral (Northey et al., 2013, Norgate et al., 2007), el alcance de esta Tesis se limita a grandes minas a cielo abierto cuyo principal producto es el concentrado de cobre. Se busca establecer relaciones entre la ley del mineral y el consumo energético, las emisiones de gases de efecto invernadero y el consumo de agua. Estas relaciones incluyen, el consumo y emisión directas que ocurren en las minas y sus instalaciones, también conocido como alcance uno; el consumo y emisiones indirectas, que corresponden a la producción de electricidad, también conocido como alcance número dos; y el consumo y emisiones ocurridas en la producción y transporte de insumos utilizados en los alcances uno y dos. Esto último se conoce como alcance número tres. La información de base es extraída de los reportes de sustentabilidad de diez minas, la que es discutida enfatizando las causas de las diferencias existentes en las variables dependientes mencionadas de dichas minas. También se realiza una comparación de estas variables con el promedio de las minas estudiadas.

La siguiente sección evidencia los objetivos de esta Tesis. En la sección tres se describe la metodología y estimaciones realizadas. Posteriormente, en la sección cuatro, se analiza y discute los resultados obtenidos para la energía directa e indirecta, las emisiones GEI y el consumo de agua. Finalmente, en la sección cinco se manifiestan las principales conclusiones de esta Tesis.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

El objetivo de este artículo es establecer relaciones entre la ley del mineral y el consumo energético, las emisiones de gases de efecto invernadero y el consumo de agua.

2.2 Objetivos Específicos

- a) Realizar un back análisis sobre los antecedentes de consumo y emisión para la minería del cobre.
- b) Contrastar los resultados obtenidos con los modelos propuestos en la literatura.
- c) Comparar y discutir las principales diferencias entre las relaciones propuestas en la literatura y las propuestas en esta Tesis.
- d) Identificar los principales insumos que afectan la huella ambiental de la minería del cobre.

3. METODOLOGÍA

Los datos considerados fueron recopilados de los reportes de sustentabilidad y financieros desde 2010 a 2016 de las minas Los Pelambres, Centinela, Los Bronces, Collahuasi, El Soldado, Escondida, Sierra Gorda, Ministro Hales, Andina y Candelaria dado que representaron cerca del 67% de la producción chilena de cobre contenido en concentrados en 2016 (Cochilco, 2017a). La información registrada corresponde a la ley de cobre, producción, consumo de energía directa e indirecta, consumo de agua fresca y emisiones de GEI de alcance 1, 2 y 3 dependiendo de la disponibilidad de la información. En la Tabla 3-1 se muestra el promedio de cada valor para cada una de las faenas, el sistema interconectado que abastece el requerimiento eléctrico, el que puede corresponder al Sistema Interconectado del Norte Grande, SING, o el Sistema Interconectado Central, SIC, y los años considerados. La discusión respecto a la dispersión y gran variabilidad de los datos se desarrollará entre las secciones 4.1 a 4.4.

Tabla 3-1: Valores promedio por faena de distintos indicadores de eficiencia

Mina/Ítem	Ley (%)	Energía directa (GJ/t Cu)	Energía indirecta (GJ/t Cu)	Grid Mix	Agua captada (m ³ /t Cu)	GEI 1 (t Co ₂ /t Cu)	GEI 2 (t Co ₂ /t Cu)	GEI 3 (t Co ₂ /t Cu)	Años
Pelambres	0.72	6.80	11.91	SIC	52	0.45	1.27	-	2010-2016
Centinela	0.63	21.91	19.47	SING	117	1.40	4.51	0.22	2011-2016
Los Bronces	0.85	10.07	16.17	SIC	75	0.75	1.44	-	2010-2016
Collahuasi	1.05	13.64	10.89	SING	79	1.20	2.32	0.92	2010-2016
El Soldado	0.76	32.15	21.78	SING	115	2.51	2.47	-	2010-2016
Escondida	1.17	12.69	11.36	SING	88	1.01	2.70	-	2010-2016
Sierra Gorda	0.36	49.89	41.52	SING	542	3.91	-	-	2015-2016
Ministro Hales	1.40	21.12	7.63	SING	91	1.46	1.79	-	2013-2016
Andina	0.80	6.63	12.14	SIC	143	0.45	0.94	-	2010-2016
Candelaria	0.67	21.26	21.75	SIC	213	1.60	2.01	0.05	2014-2016

La energía directa (E_d) es aquella que es consumida desde su forma primaria (combustibles) en la faena. Mientras que la energía indirecta (E_i) corresponde a la

electricidad producida por fuentes de generación externas al sistema derivada de los requerimientos productivos (Codelco, 2011).

Por otra parte, el agua captada (w_c) corresponde al agua total (w_t) para producir el cobre menos aquella que ha sido reciclada, reusada (w_r) o utilizada para producir los insumos necesarios para el minado y procesamiento del mineral (w_i) (Lagos et al., 2018). Puede provenir de distintas fuentes, incluyendo superficial, subterránea, del océano y de terceras partes (GRI, 2018).

$$w_t = w_r + w_c + w_i \quad (3.1)$$

Las emisiones de alcance uno (GEI_1) son las emisiones directas procedentes de las actividades que la organización/empresa puede controlar, las emisiones de alcance dos (GEI_2), por su parte, hacen referencia a las emisiones indirectas que se generan en las centrales de producción de electricidad como consecuencia del consumo de electricidad que la organización/empresa necesita para su producto y/o servicio. Finalmente, las emisiones de alcance tres (GEI_3) corresponden al resto de las emisiones indirectas que se generan como consecuencia de las actividades que ocurren en fuentes que no son controladas por la organización/empresa (Cochilco, 2016).

Para la estimación de las emisiones de alcance uno se multiplica el consumo de energía directa unitario por el factor de emisión del petróleo, es decir, $77.4 \frac{\text{kg CO}_2}{\text{GJ}}$, ya que este representa más del 80% del combustible consumido por las faenas mineras de acuerdo con el Ministerio de Energía Gobierno de Chile (2017).

$$GEI_1 \left(\frac{t \text{ CO}_2}{t \text{ Cu}} \right) = 0.0774 E_d \quad (3.2)$$

El alcance 2, por su parte, resulta de considerar el factor de emisión del SING o SIC de cada año según corresponda a cada faena considerada en este estudio, el factor de emisión global al realizar la ponderación por producción sobre la data recopilada es de $0.17 \frac{t \text{ CO}_2}{\text{GJ}}$.

Cabe mencionar que en el caso de las emisiones de alcance 2 la estimación tenderá a ser ligeramente mayor debido a que algunas de las faenas consideradas en el estudio abastecen

parcialmente sus requerimientos eléctricos con energías renovables no convencionales, ERNC.

$$GEI_2 \left(\frac{t CO_2}{t Cu} \right) = \frac{\sum_{j,k} f_{j,k} P_{j,k}}{\sum_{j,k} P_{j,k}} E_i \quad (3.3)$$

Donde $f_{j,k}$ es el factor de emisión del sistema interconectado j para el año k , y $P_{j,k}$ la producción de cobre producido en el sistema interconectado j en el año k .

Se debe mencionar que la mayoría de las empresas reportan esta información de acuerdo con las directrices del GRI. Sin embargo, en aquellos casos en que el reporte sigue normas locales, como por ejemplo reportar el volumen de combustible utilizado en vez de la energía directa, se realizaron estimaciones acordes tales como la consideración del poder calorífico de cada insumo energético. Además, en el caso de las faenas en las que parte de la explotación se realiza de manera subterránea, como por ejemplo Andina, se recalculan los indicadores considerando:

$$\Psi_i = \frac{\psi_i - P_j u\% f_{i,j}}{P_j} \quad (3.4)$$

Donde Ψ_i es la información ajustada, ψ_i la información reportada por las empresas, P_j la producción del año j , $u\%$ el porcentaje de producción obtenida mediante minería subterránea y $f_{i,j}$ el factor unitario de transformación del indicador i para el año j de acuerdo con Cochilco (2017a). Mientras que en el caso de aquellas faenas que además de la producción de concentrado de cobre también producen cátodos debido al procesamiento de óxidos, como en Collahuasi, Escondida y Los Bronces, se realizó el ajuste mediante:

$$\Psi_i = \frac{\psi_i - S_j f_{i,j}}{P_j} \quad (3.5)$$

Donde S_j corresponde a la producción de cobre vía SX/EW para el año j .

Las emisiones de alcance tres son escasamente reportadas, por lo que el enfoque para su estimación se basó en el modelamiento del LCA del concentrado de cobre, mediante el software GaBi 8 de la empresa Thinkstep, este software tiene como base del modelamiento la realización del diagrama de flujo de la mina y concentradora considerando los

principales insumos para el minado y concentración correspondientes a explosivos, ácidos y aditivos, producción de diésel, transporte de agua y producción de insumos para la generación de electricidad (ICA, 2017). GaBi 8 cuenta con una extensa base de datos que permite incorporar el análisis de ciclo de vida de cada insumo para la producción de cobre en el modelamiento. Además, entrega los resultados de impacto del análisis de ciclo de vida (*LCIA*, por sus siglas en inglés) de la producción conjunta.

4. RESULTADOS

4.1 Consumo de Energía

Los modelos desarrollados en este trabajo se basan principalmente en los trabajos hechos por Page y Creasey (1975), Northey, Haque y Mudd (2013) y Koppelaar y Koppelaar (2016), quienes proponen modelos potenciales para explicar la relación existente entre la ley de cobre y el consumo energético por tonelada de metal producido. Northey et al. (2013) separan la estimación de consumo energético para las vías de procesamiento de hidrometalurgia (lixiviación, extracción por solvente y electroobtención) y concentración.

El modelo planteado por Koppelaar y Koppelaar (2016) incluye la energía directa e indirecta en forma agregada, lo que constituye una modificación del modelo de Page y Creasey (1975) el que explica el efecto másico de la ley de cobre en el consumo energético. En este trabajo se plantea ecuaciones desagregadas para la energía directa e indirecta.

$$E_r \left(\frac{GJ}{t Cu} \right) = \alpha_r + \beta_r g^{\epsilon_r} \quad (4.1.1)$$

Con r energía directa o indirecta y g la ley de cobre.

El parámetro α propuesto por Koppelaar y Koppelaar (2016) corresponde a la energía mínima necesaria para obtener el cobre contenido en el concentrado. Es también la asíntota del modelo, es decir, a medida que la ley de cobre se incrementa, entonces la energía tiende al valor de α . En el caso de la energía indirecta, el valor de α es 0 debido a que para el máximo valor de ley posible, es decir, 100%

correspondiente a cobre nativo, la energía consumida correspondería solo a la energía producto de la quema de combustible requerido para el transporte de material.

El parámetro β corresponde al costo energético (Norgate, 2000) es decir, la cantidad de energía ya sea directa o indirecta, necesaria por cantidad de cobre contenido. Mientras que ϵ representa el efecto másico de la ley, en otras palabras, para obtener la misma cantidad de fino con la mitad de cobre por tonelada, entonces, se ha de transportar y moler el doble de mineral, es por esta razón que en ambos casos ϵ toma el valor de -1.

Se estudió la relación entre la energía consumida por tonelada de cobre producida en la mina y en la planta concentradora y la ley del mineral. En las Figuras 1 y 2 se muestran los resultados para diez minas de cobre chilenas, así como la estimación producto de ajustar la ecuación 4.1.1 a los valores recopilados. Se puede notar que existe un comportamiento potencial en el que a menor ley mayor será el consumo, y viceversa. La ecuación 4.1.2 muestra la relación entre la energía directa por tonelada de cobre producido utilizada en estas minas y la ley del mineral, mientras que la ecuación 4.1.3 muestra la relación entre la energía indirecta por tonelada de cobre producido y la ley del mineral.

$$E_d \left(\frac{GJ}{t Cu} \right) = 4 + \frac{10.7}{g} \quad R^2 = 0.42 \quad (4.1.2)$$

$$E_i \left(\frac{GJ}{t Cu} \right) = \frac{12.4}{g} \quad R^2 = 0.74 \quad (4.1.3)$$

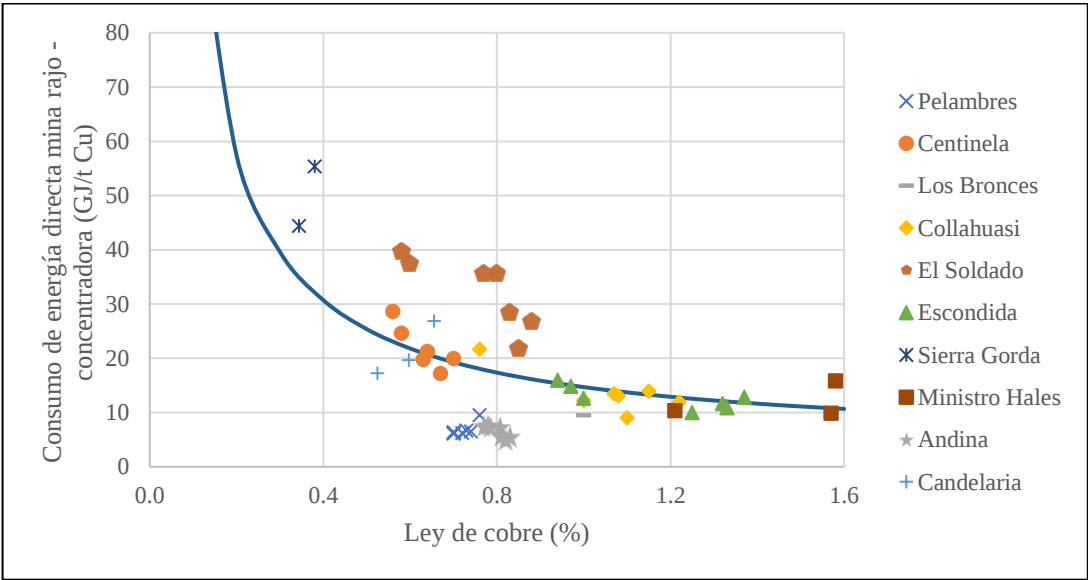


Figura 4-1: Consumo unitario de energía directa vs ley de cabeza

La diferencia en consumo de energía directa entre dos minas con ley similar llega al 380% en el caso de El Soldado y Pelambres. Ello se explica debido a, entre otros, factores como la topografía, mayor profundidad del yacimiento de El Soldado y al uso de camiones de menor tonelaje que Pelambres, la que también cuenta con un sistema de monitoreo en línea con General Electric y ha disminuido en un 4% la potencia de sus camiones de extracción (Antofagasta Minerals S.A., 2016b). Por otro lado, la mina Los Bronces, que tiene uno de los menores consumos de energía directa por tonelada de cobre producido, ha logrado disminuir su consumo de diésel debido a la incorporación de flota de mayor tonelaje y la optimización de colas y tiempos muertos de su flota de transporte (Anglo American, 2017b).

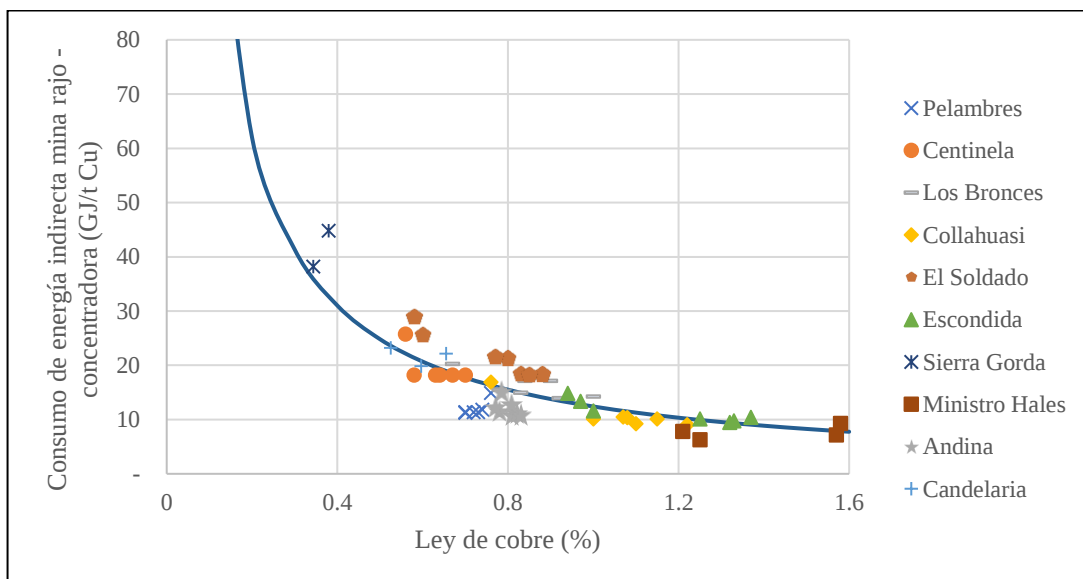


Figura 4-2: Consumo unitario de energía indirecta vs ley de cabeza

Es posible observar en las Figuras 4-1 y 4-2 que la ley de cobre tiene gran capacidad explicativa del consumo energético. Sin embargo, en el caso de la energía directa los factores estructurales de cada mina deben complementar la relación. Como mencionan Norgate, Jahanshahi y Rankin (2007), el consumo total de energía es influenciado principalmente por la ley de cobre, y esta no tiene relación de dependencia directa con otros factores como el tamaño de partícula, según evidencian Jacob, Cooper, Gutowski y Ramoz-Grez (2017), o con la energía específica de conminución (Ballantyne & Powell, 2014) o la profundidad (Koppelaar & Koppelaar, 2016).

Las minas explotadas a cielo abierto en Chile utilizaron el 92% de la energía directa entre 2010 y 2016, mientras que el 8% de dicha energía se utilizó en las plantas concentradoras. En el caso de la energía indirecta, solo el 2% fue utilizada en el

minado y el porcentaje restante, es decir, el 98%, fue utilizado en las plantas concentradoras (Cochilco, 2017a). Con esto es posible separar el consumo energético de la mina y la planta concentradora.

Si bien, las diferencias de consumo de energía indirecta para leyes similares de hasta 200% es relativamente menor que en el caso de la energía directa, es posible explicarlas principalmente por la dureza del mineral que tiene como consecuencia mayor consumo en la etapa de reducción de tamaño. Las faenas que abastecen su requerimiento energético desde el SIC presentan 1.5 veces el consumo de las faenas abastecidas por el SING. Esto se debe mayormente a la dureza del mineral que para la zona norte es de 13-15 kWh/t y para la zona vinculada al SIC es de 15-20kWh/t (Minería Chilena, 2009).

El chancado, molienda y flotación consumen en promedio un 7%, 68% y 25% de la energía consumida en una planta concentradora, respectivamente. Esto se obtiene luego de compilar las estimaciones realizadas por Mardsen (2008), Rankin (2011), Armas y Poma (2013), Koppelaar y Koppelaar (2016) y la disponible de las minas Candelaria, El Soldado y Los Bronces. Según estos autores la energía consumida correspondiente a chancado varía entre 3.6 y 9 MJ/t de mineral, la energía ocupada en molienda varía entre 68 y 81 MJ/t de mineral y el resto de los procesos, incluyendo flotación, clasificación, transporte de pulpa y de agua dentro de la planta, consumen entre 18 y 25 MJ/t de mineral. Tomando esto en consideración, al realizar la distribución de energía propuesta y la separación mina-concentradora de Cochilco

(2016a), los requerimientos energéticos totales en GJ por tonelada de cobre contenido en el concentrado pueden expresar mediante las siguientes ecuaciones:

$$E_{Mina} \left(\frac{GJ}{t Cu} \right) = 3.7 + \frac{10.1}{g} \quad (4.1.4)$$

$$E_{Chancado} \left(\frac{GJ}{t Cu} \right) = \frac{0.9}{g} \quad (4.1.5)$$

$$E_{Molienda} \left(\frac{GJ}{t Cu} \right) = 0.2 + \frac{8.8}{g} \quad (4.1.6)$$

$$E_{Flotación} \left(\frac{GJ}{t Cu} \right) = 0.1 + \frac{3.3}{g} \quad (4.1.7)$$

Cabe destacar que el aporte del parámetro α en el caso de la energía requerida en el proceso de chancado es despreciable por lo que se consideró igual a 0.

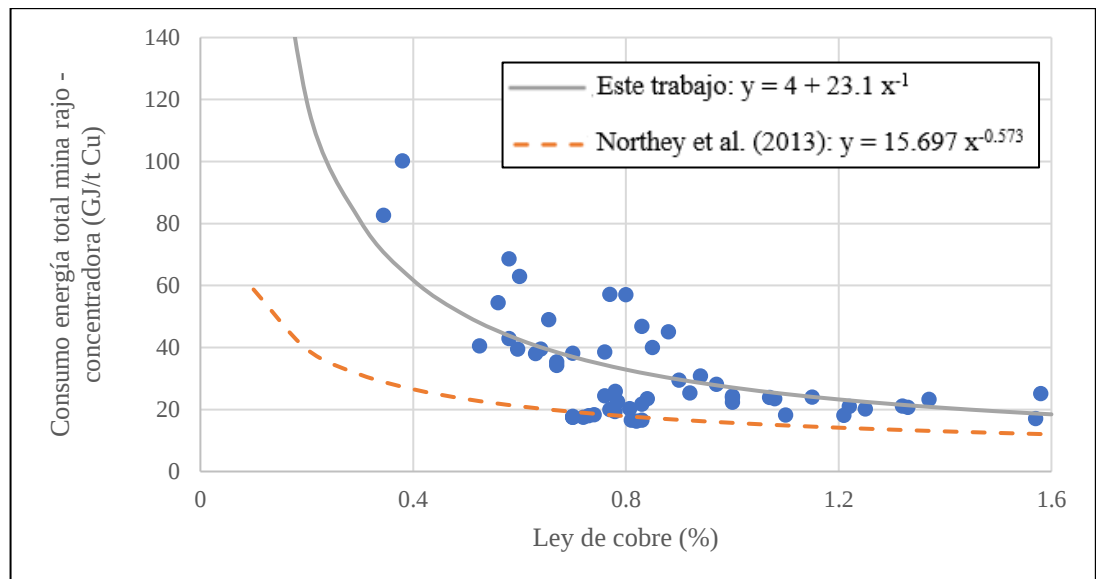


Figura 4-3: Comparación modelos de Northey et al. (2013) y de este trabajo respecto a la data actual

En la Figura 4-3 se aprecia que el modelo de Northey et al. (2013) estima valores de energía total consumida en la mina y en la concentradora, menores a los reportados en este trabajo (línea superior y continua). Ello ocurre, primero, porque Northey et al. (2013) agrega los datos de minas de cielo abierto y subterráneo. Para estas últimas el consumo de energía total consumida por unidad de cobre contenido producido es 40.7% de la energía requerida en las minas de cielo abierto en 2016 (Cochilco, 2017a). Por otra parte, los datos de Northey et al. (2013) son más antiguos ya que incluyen información desde 1991 hasta 2010, mientras que la de este trabajo va desde 2010 a 2016. Como analizó Lagos et al. (2018), existen los factores de envejecimiento como la ley del mineral, la profundidad de las minas y la dureza de la roca, que implican que el valor del consumo de energía por unidad de cobre contenido más antiguo sea menor que el valor más reciente para una misma mina.

4.2 Consumo de Agua

Se analiza la información histórica del consumo de agua de las faenas mencionadas anteriormente utilizando la misma lógica que en el caso de la energía, con lo que se obtiene un comportamiento similar, de tipo potencial y con consumo decreciente respecto a una ley de cobre mayor. La explicación teórica de esta curva está dada por múltiples factores, el principal es el efecto másico discutido para el caso del consumo de energía, por el cual para obtener una misma cantidad de cobre refinado con una ley menor se debe procesar mayor cantidad de material.

Además, se incluyen parámetros operacionales como la tasa de recirculación, es decir, la cantidad de agua reutilizada dividida por el agua total utilizada. Esta tasa

teóricamente puede variar entre 0% y 100%, pero no puede llegar a este último valor ya que una parte del agua se pierde en filtraciones, evaporación, y retención en material de las colas (Cochilco, 2017c). Según Wels y Roberston (2003), del total del agua depositada en el relave se evapora hasta un 52%, mientras que las pérdidas por filtraciones y el agua retenida por el material corresponden a un 17% y 11%, respectivamente. Esto significa que los relaves pierden agua a razón de entre 0.35 y 0.65 m³/t de pulpa (Nueva Minería y Energía, 2016). Además, la comercialización del concentrado suele hacerse con humedades de entre 8 a 12% (Chaparro, 2009) disminuyendo aún más el potencial de recirculación. Sin embargo, existen tecnologías que permiten aumentar las tasas de recirculación, por ejemplo, la clasificación de relaves vía hidrociclones (Nueva Minería y Energía, 2016) que permite separar las arenas enviándolas al muro del tranque, y descargar las lamas dentro de este (Pino, 2011), y el uso de espesadores, los que pueden recuperar, en promedio, el equivalente al 50% de la tasa de recirculación dependiendo del tipo de mineral y del diseño (Pacheco & Durán, 2007). En 2016, las plantas de concentración chilenas registraron una tasa de recirculación de 71% (Cochilco, 2017c), de la cual, se estima, la mayor parte proviene de la disposición de los relaves (Gunson, Klein, Veiga & Dunbar, 2012).

La ecuación 4.2.1 relaciona el consumo de agua nueva con la cantidad de agua requerida para procesar el mineral y con otros parámetros de la operación.

$$w_c \left(\frac{m^3}{t \text{ Cu}} \right) = \frac{w_p(1-R)}{F_R g} \quad (4.2.1)$$

Donde w_c corresponde a la captación de agua estimada por unidad de cobre contenido, w_p es el consumo unitario de agua de la faena para procesar el mineral, F_R es la recuperación en el proceso de concentración y R es la fracción de recirculación.

La ecuación 4.2.2 se escribe para el promedio de las minas estudiadas de la siguiente manera:

$$w_c \left(\frac{m^3}{t \text{ Cu}} \right) = \frac{98}{g} \quad R^2 = 0.6 \quad (4.2.2)$$

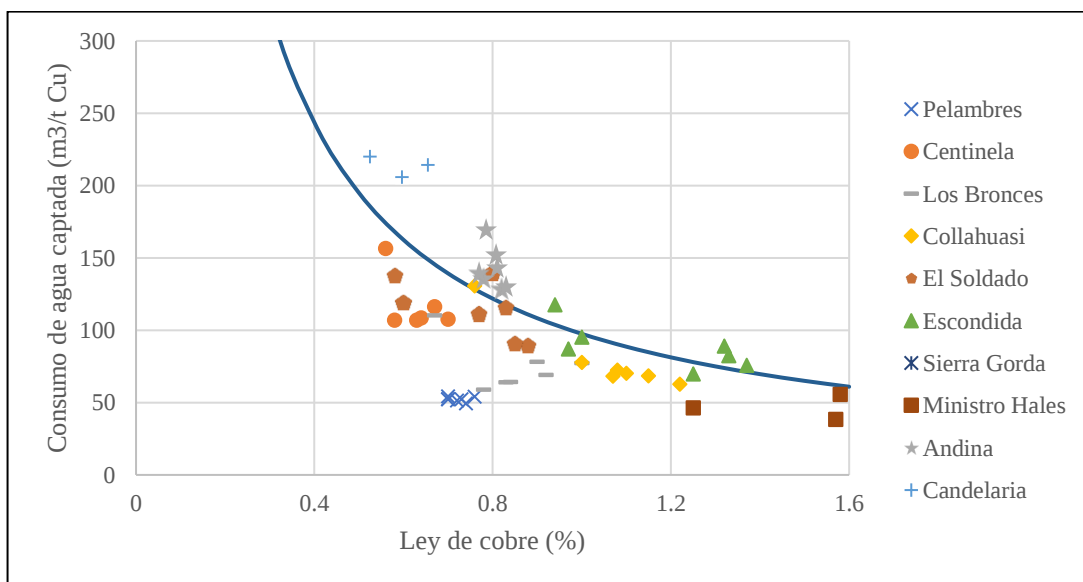


Figura 4-4: Consumo de agua captada por tonelada de cobre producido versus ley de cabeza

En la Figura 4-4 se observa gran dispersión en los datos debido a las diferencias entre las diversas operaciones. Pelambres y Los Bronces, por ejemplo, consumen mucho menos agua que lo estimado por el modelo de la ecuación 4.2.2, mientras que

otras minas como Andina y Candelaria consumen agua muy por sobre dicho modelo. Esto ocurre debido a que Pelambres y Los Bronces tienen recirculaciones mucho mayores al promedio correspondientes a 85% (Antofagasta Minerals S.A., 2014b) y 79% (Anglo American, 2015a) en 2014, respectivamente. Andina, en cambio, tiene una tasa de recirculación de 48.7% para el mismo año (Codelco, 2015) y Candelaria fue multada recientemente por no rebajar sus consumos de agua fresca (Minería Chilena, 2018). Aquellas minas que presentan menores tasas de recirculación suelen tener su planta concentradora a mucho mayor altura que los relaves y/o espesadores, lo que significa un alto costo energético e inversional para bombear el agua de vuelta al proceso, siendo económicamente inconveniente (Cochilco, 2017c). Otros factores que influyen la tasa de captación de agua y/o el porcentaje de recirculación según Cochilco (2017c) son: la humedad ambiental de la ubicación geográfica y la consecuente evaporación en los relaves; la disponibilidad de agua en la zona que determina el estrés regional y el grado de gestión del recurso hídrico; la cercanía a la costa y elevación de las instalaciones, variables que afectan el costo de bombeo de agua de mar.

4.3 Emisiones GEI de alcances uno y dos

En la Figura 4-5 se muestra la información reportada por las minas respecto a sus emisiones de GEI y la estimación de emisión promedio para las faenas estudiadas (línea continua) utilizando las ecuaciones 4.3.1 y 4.3.2, respectivamente. Se observa que las emisiones de GEI de alcance uno, con diferencias de hasta un 600%, tienen una dispersión similar al consumo de energía directa (Figura 4-1) para minas de ley

similar. ya que cada punto se puede obtener directamente con el factor de conversión de los combustibles utilizados por cada una de las faenas. En cambio, las emisiones de alcance dos, con diferencias de hasta un 540%, muestran mucha más dispersión que la Figura 4-2 debido a que no todas las minas se encuentran en el mismo sistema interconectado por lo que los factores de emisión son distintos dependiendo de la ubicación geográfica. Además, como se mencionó anteriormente, parte del requerimiento de energía indirecta es generado por operaciones que cuentan parcialmente con energía ERNC como el caso de Pelambres.

$$GEI_1 \left(\frac{t CO_2}{t Cu} \right) = 0.3 + \frac{0.83}{g} \quad (4.3.1)$$

$$GEI_2 \left(\frac{t CO_2}{t Cu} \right) = \frac{2.1}{g} \quad (4.3.2)$$

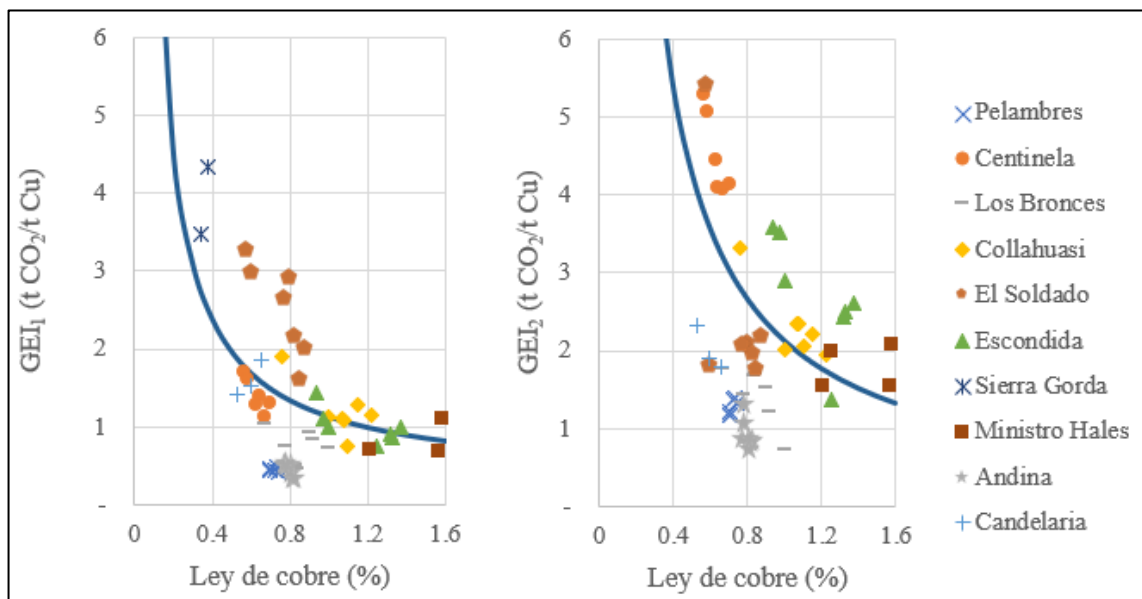


Figura 4-5: Emisiones GEI de alcances 1 (izquierda) y 2 (derecha) por tonelada de cobre producido versus ley de cabeza

4.4 Emisiones de alcance tres y LCIA

Para completar la estimación de emisiones de GEI se calcularon las emisiones de alcance tres utilizando el software GaBi 8, mediante el cual se modela el consumo en las operaciones de los principales insumos para leyes de cobre desde 0.2% hasta 1.6% de cobre mina a manera de crear una curva experimental de emisiones de alcance tres.

Los insumos relevantes (ICA, 2017) para la producción de concentrado son mineral de sulfuro de cobre, explosivos, caliza, ácido sulfúrico, agua, diésel, electricidad, entre otros. Para estimar la cantidad de estos insumos se realizó una comparación de las cifras reportadas por ICA (2017) y las cifras de las 10 minas en estudio,

informadas en reportes financieros y de sustentabilidad de las empresas correspondientes. Ya que la ley media del estudio de ICA (2017) fue de 0.6% y la ley media de la muestra de la presente Tesis es 0.9%, se realizó un ajuste de los valores utilizando las ecuaciones 4.1.2, 4.1.3 y 4.2.2.

Tabla 4-1: Inputs relevantes para la producción de una tonelada de cobre a 2016 con mineral de ley 0.6%

Insumo	Cantidad
Mineral (Sulfuro)	140 t
Estéril	180 t
Explosivos	154 kg
Cal	102 kg
Caliza	135 kg
Ácido Sulfúrico	16 kg
Material auxiliar	60 kg
Agua	225 m ³
Diésel	398 kg
Electricidad	22.6 GJ
Gasolina	0.48 kg
HFO	1.67 kg
Gas natural	360 MJ

GaBi 8 cuenta con una amplia base de datos mediante la cual es posible ejecutar el análisis de ciclo de vida para los insumos listados en la Tabla 4-1. Las emisiones unitarias alcance tres producto del modelamiento en GaBi 8 se muestran en la Tabla 4-2. En el caso de la electricidad los resultados son consecuencia de la producción y transporte de insumos para la generación eléctrica. El cálculo de los reactivos considera el minado y procesamiento de la caliza, producción de cal y floculante,

mientras que los explosivos, tales como ANFO, incluye la producción primaria del nitrato de amonio. En el caso del combustible, se considera su transporte al lugar de uso.

Tabla 4-2: Factores de emisión (alcance 3) para principales insumos por tonelada de cobre contenida en concentrado según modelamiento en GaBi 8

Insumo	Emisiones (kg CO ₂ /t Mineral)
Electricidad	433
Reactivos	112
Explosivos	108
Combustibles	58
Otros	23

En la Tabla 4-3 se muestran los requerimientos energéticos y emisiones por tonelada de cobre para una ley de sulfuros de cobre de 0.9%, la ley media de las faenas analizadas entre 2010 a 2016 considerando las ecuaciones 4.1.2, 4.1.3, 4.3.1 y 4.3.2 así como el modelamiento en GaBi. Además, en la Tabla 4-4 se muestra la suma de energía directa e indirecta utilizada en cada una de las etapas del procesamiento que se desprende de las ecuaciones 4.1.4 a 4.1.7.

Tabla 4-3: Energía y emisiones GEI por tonelada de cobre por alcance para ley media estudiada

E ₁	15.9 GJ/t Cu	GEI ₁	1.2 t CO ₂ /t Cu
E ₂	13.8 GJ/t Cu	GEI ₂	2.3 t CO ₂ /t Cu
E ₃	8.6 GJ/t Cu	GEI ₃	0.8 t CO ₂ /t Cu

Tabla 4-4: Energía del proceso (directa + indirecta) por operación unitaria
por tonelada de cobre para ley de 0.9%

E_{Mina}	14.9 GJ/t Cu
E_{Chancado}	1 GJ/t Cu
E_{Molienda}	10 GJ/t Cu
$E_{\text{Flotación}}$	3.8 GJ/t Cu

Finalmente, los resultados del LCIA se aprecian en la tabla 6, los que son producto del modelamiento en GaBi 8 para una tonelada de cobre producido con mineral de ley de 0.6%, ley analizada por ICA (2017). Los valores del LCIA son similares a lo calculado por ICA (2017), el porcentaje de diferencia es de 1% para el potencial de acidificación (AP), 15% para el potencial de eutroficación (EP), 75% para el potencial de agotamiento de ozono (ODP) y 14% para el potencial fotoquímico de creación de ozono (POCP). Estas diferencias se pueden explicar por factores como la gran presencia de carbón en la matriz energética considerada en este artículo, la concentración geográfica debido a que la estimación del ICA es global mientras que la propuesta en este artículo se ajusta a las minas estudiadas, todas ubicadas en Chile en su mayoría en zonas desérticas y, finalmente, debido a que todas las faenas consideradas en este estudio extraen el mineral mediante minería a cielo abierto, mientras que ICA (2017) no distingue entre métodos de explotación.

Tabla 4-5: Resultados LCIA por tonelada de cobre para ley de 0.6%

Ítem	Este trabajo	ICA (2017)
AP	28.9 kg SO ₂	29.3 kg SO ₂
EP	3 kg PO ₄ ³⁻	2.6 kg PO ₄ ³⁻
ODP	1.5 e-8 kg CFC-11	6.1 e-8 kg CFC-11
POCP	1.8 kg C ₂ H ₄	2.1 kg C ₂ H ₄

5. CONCLUSIONES

Es posible concluir, en primer lugar, que tanto los consumos de energía directa e indirecta y del agua, así como las emisiones de GEI de alcances uno, dos y tres tienen un comportamiento potencial respecto a la ley de cobre del mineral que entra en la planta concentradora. Además, el efecto másico explica en gran medida la dependencia entre las variables. Esto confirma las conjeturas realizadas por diversos autores sobre la importancia de la ley de cobre del mineral en la huella ambiental de una faena.

La máxima diferencia en consumo de energía directa por tonelada de cobre producida en dos minas de la muestra estudiada, de aproximadamente la misma ley de cobre, fue de 380%, mientras que este valor fue de 200% para el consumo de energía indirecta. La primera se refleja en las emisiones directas de GEI por tonelada de cobre producida, las que fueron de hasta 600% para dos minas de ley similar de cobre, pero, en cambio, fueron de 540% para las emisiones indirectas de GEI por tonelada de cobre producida para dos minas con aproximadamente la misma ley de cobre. La enorme diferencia en estas últimas se produjo principalmente por el peso que tenía el uso de carbón en el SING, con respecto al uso de carbón en el SIC. La diferencia en emisiones directas es más compleja de explicar ya que puede tener origen en la disposición de los yacimientos y en otros factores naturales, además de la gestión de la mina, y de la selección y actualización de los equipos usados.

Sobre la mitad de los GEI emitidos por estas 10 minas en el periodo considerado, fueron resultado de la producción de electricidad, 27% fueron debido al consumo directo de combustibles, y 19% debido a la producción y transporte de insumos requeridos (alcance tres) para la extracción y procesamiento del cobre. De estos últimos cerca del 59% se asocia a los insumos requeridos para la generación de electricidad.

En cuanto al consumo de agua por tonelada de cobre producida se observaron diferencias de hasta 260% para dos minas con aproximadamente la misma ley de cobre. Esto último se debe, principalmente, a la recirculación de agua muy variables que existen. Con valores menores a 50% hasta valores mayores a 85%. Sin embargo, si se quiere hablar de una minería realmente sustentable, es decir, entonces, se debe considerar incorporar la

reducción de la huella ambiental además del costo económico de bombear el agua de vuelta a la operación para aumentar la tasa de recirculación,

Estos resultados indican que la forma más obvia de reducir sustancialmente las emisiones de GEI por tonelada de cobre contenida en concentrados es instalar fuentes de energía eléctrica renovables que reemplacen las fuentes de energía basadas en combustibles fósiles. De esta forma habría también una reducción sustancial de las emisiones GEI de alcance 3. Además, debido a que la diferencia de consumo de energía directa para faenas de ley similar es prácticamente el doble que el mismo valor para el consumo de energía indirecta, las medidas para disminuir el consumo energético de las faenas deberían apuntar a reducir, en primer lugar, el consumo de combustible mediante medidas gestionables como utilización de equipos más eficiente, de mayor capacidad y el ajuste de la potencia a los requerimientos de la faena por sobre la potencia nominal.

BIBLIOGRAFIA

Anglo American. (2011a) Reporte de sustentabilidad 2010. Recuperado de https://chile.angloamerican.com/~media/Files/A/Anglo-American-Chile-V2/reports-and-presentations/chile_sd_report_2010_sp.pdf

Anglo American. (2011b). Annual Report 2010. Recuperado de <https://www.angloamerican.com/~media/Files/A/Anglo-American-PLC-V2/investors/reports/aa-annual-report-2011.pdf>

Anglo American. (2012a) Reporte de sustentabilidad 2011. Recuperado de https://chile.angloamerican.com/~media/Files/A/Anglo-American-Chile-V2/reports-and-presentations/chile_sd_report_2011_sp.pdf

Anglo American. (2012b). Annual Report 2011. Recuperado de <https://www.angloamerican.com/~media/Files/A/Anglo-American-PLC-V2/investors/reports/aa-annual-report-2011.pdf>

Anglo American. (2013a) Reporte de sustentabilidad 2012. Recuperado de https://chile.angloamerican.com/~media/Files/A/Anglo-American-Chile-V2/reports-and-presentations/chile_sd_report_2012_sp.pdf

Anglo American. (2013b). Annual Report 2012. Recuperado de <https://www.angloamerican.com/~media/Files/A/Anglo-American-PLC-V2/investors/reports/annual-report2012.pdf>

Anglo American. (2014a) Reporte de sustentabilidad 2013. Recuperado de https://chile.angloamerican.com/~media/Files/A/Anglo-American-Chile-V2/reports-and-presentations/chile_sd_report_2013_sp.pdf

Anglo American. (2014b). Annual Report 2013. Recuperado de <https://www.angloamerican.com/~media/Files/A/Anglo-American-PLC-V2/investors/reports/annual-report2013.pdf>

Anglo American. (2015a) Reporte de sustentabilidad 2014. Recuperado de https://chile.angloamerican.com/~media/Files/A/Anglo-American-Chile-V2/reports-and-presentations/chile_sd_report_2014_sp.pdf

Anglo American. (2015b). Annual Report 2014. Recuperado de <https://www.angloamerican.com/~media/Files/A/Anglo-American-PLC-V2/documents/annual-reporting-2016/downloads/annual-report-2016-interactive-v2.pdf>

Anglo American. (2016a) Reporte de sustentabilidad 2015. Recuperado de https://chile.angloamerican.com/~media/Files/A/Anglo-American-Chile-V2/reports-and-presentations/chile_sd_report_2015_sp_2.pdf

Anglo American. (2016b). Annual Report 2015. Recuperado de <https://www.angloamerican.com/~media/Files/A/Anglo-American-PLC-V2/documents/aa-ar-15.pdf>

Anglo American. (2017a) Reporte de sustentabilidad 2016. Recuperado de https://chile.angloamerican.com/~media/Files/A/Anglo-American-Chile-V2/reports-and-presentations/chile_sd_report_2016_sp.pdf

Anglo American. (2017b). Reporte de Avance del Convenio de Cooperación entre Ministerio de Energía y Consejo Minero. Disponible en <http://consejominero.cl/wp-content/themes/consejominero/img/angloamerican.pdf>

Anglo American. (2017c). Annual Report 2016. Recuperado de <https://www.angloamerican.com/~media/Files/A/Anglo-American-PLC-V2/documents/annual-reporting-2016/downloads/annual-report-2016-interactive-v2.pdf>

Antofagasta Minerals (2011). Reporte de Sustentabilidad 2010. Recuperado de http://www.aminerals.cl/media/3629/antofagasta-minerals_reporte-de-sustentabilidad-antofagasta-plc-2010.pdf

Antofagasta Minerals (2014a). Reporte de Sustentabilidad 2013. Recuperado de <http://www.antofagasta.co.uk/media/2707/sustainability-report-2013-spanish-version.pdf>

Antofagasta Minerals (2014b). Gestión Hídrica en Minera Los Pelambres. Recuperado de <http://www.jvriochoapa.cl/wp-content/uploads/2014/09/Presentaci%C3%B3n-Minera-Los-Pelambres.ppt>

Antofagasta Minerals (2015). Reporte de Sustentabilidad 2014. Recuperado de http://www.aminerals.cl/media/3630/antofagasta-minerals_reporte-de-sustentabilidad-antofagasta-plc-2014.pdf

Antofagasta Minerals (2016a). Reporte de Sustentabilidad 2015. Recuperado de http://www.aminerals.cl/media/3631/antofagasta-minerals_reporte-de-sustentabilidad-antofagasta-plc-2015.pdf

Antofagasta Minerals (2016b). Reporte de Avance del Convenio de Cooperación entre Ministerio de Energía y Consejo Minero. Disponible en <http://consejominero.cl/wp-content/themes/consejominero/img/amsa.pdf>

Antofagasta Minerals (2017). Reporte de Sustentabilidad 2016. Recuperado de http://www.aminerals.cl/media/5534/antofagasta-minerals_rs16.pdf

BHP Billiton. (2012). BHP BILLITON PRODUCTION REPORT FOR THE HALF YEAR ENDED 31 DECEMBER 2011. Recuperado de https://www.bhp.com/-/media/bhp/documents/investors/reports/2012/120118_bhp-billiton-production-report-for-the-half-year-ended-31-december-2011.pdf

BHP Billiton. (2013). BHP BILLITON PRODUCTION REPORT FOR THE HALF YEAR ENDED 31 DECEMBER 2012. Recuperado de https://www.bhp.com/-/media/bhp/documents/investors/reports/2013/130123_bhp-billiton-production-report-for-the-half-year-ended-31-december-2012.pdf

BHP Billiton. (2014). BHP BILLITON PRODUCTION REPORT FOR THE HALF YEAR ENDED 31 DECEMBER 2013. Recuperado de https://www.bhp.com/-/media/bhp/documents/investors/news/2014/140122_bhpbillitonoperationalreviewforthehalfyearended31december2013.pdf

BHP Billiton. (2015a). BHP BILLITON PRODUCTION REPORT FOR THE HALF YEAR ENDED 31 DECEMBER 2014. Recuperado de https://www.bhp.com/-/media/bhp/documents/investors/news/2015/150121_bhpbillitonoperationalreviewforthehalfyearended31december2014.pdf

BHP Billiton Chile. (2015b). Sustainability Report 2014. Recuperado de <https://www.bhp.com/-/media/bhp/documents/society/reports/2014/csr-eng150518sustainabilityreport2014bhpbillitonchileoperations.pdf>

BHP Billiton. (2016a). BHP BILLITON PRODUCTION REPORT FOR THE HALF YEAR ENDED 31 DECEMBER 2015. Recuperado de https://www.bhp.com/-/media/bhp/documents/investors/reports/2016/160120_bhpbillitonoperationalreviewforthehalfyearended31december2015.pdf

BHP Billiton Chile. (2016b). Sustainability Report 2015. Recuperado de https://www.bhp.com/-/media/bhp/documents/society/reports/2016/160509_sustainabilityreport2015_chileanoperations.pdf

BHP Billiton. (2017a). BHP BILLITON PRODUCTION REPORT FOR THE HALF YEAR ENDED 31 DECEMBER 2016. Recuperado de https://www.bhp.com/-/media/documents/media/reports-and-presentations/2017/170125_bhpbillitonoperationalreviewforthehalfyearended31december2016.pdf?la=en

BHP Billiton Chile. (2017b). Informe de Sustentabilidad 2016. Recuperado de https://www.bhp.com/-/media/documents/media/reports-and-presentations/2017/170807_bhpinformedesustentabilidadabhpchile.pdf

Ballantyne, G., Powell, M. (2014). Benchmarking comminution energy consumption for the processing of copper and gold ores. *Minerals Engineering*, 65, 109-114.

Calvo, G., Mudd, G., Valero, A., Valero, A. (2016). Decreasing Ore Grades in Global Metallic Mining: A Theoretical Issue or a Global Reality?. *Resources*, 5, 36.

CDEC-SIC. (2013a). Operación Real Anual 2010. Recuperado de <https://sic.coordinador.cl/wp-content/uploads/2013/08/10.xls>

CDEC-SIC. (2013b). Operación Real Anual 2011. Recuperado de <https://sic.coordinador.cl/wp-content/uploads/2013/08/11.xls>

CDEC-SIC. (2013c). Operación Real Anual 2012. Recuperado de <https://sic.coordinador.cl/wp-content/uploads/2013/08/12.xls>

CDEC-SIC. (2014). Operación Real Anual 2013. Recuperado de <https://sic.coordinador.cl/wp-content/uploads/2014/03/131.xls>

CDEC-SIC. (2015). Operación Real Anual 2014. Recuperado de <http://sic.coordinadorelectrico.cl/wp-content/uploads/2015/03/14.xls>

CDEC-SIC. (2016). Operación Real Anual 2015. Recuperado de <http://sic.coordinadorelectrico.cl/wp-content/uploads/2016/09/15.xlsx>

CDEC-SIC. (2017). Operación Real Anual 2016. Recuperado de <https://sic.coordinador.cl/wp-content/uploads/2017/01/16.xlsx>

CDEC-SING. (2016). INFORME TRIMESTRAL CDEC-SING JULIO-SEPTIEMBRE 2016. Recuperado de http://cdec2.cdec-sing.cl/pls/portal/cdec.pck_web_coord_elec.sp_pagina?p_id=5029#

Cochilco (2016). Informe sobre las emisiones indirectas de gases de efecto invernadero al 2015. DEPP 23/2016. Comisión Chilena del Cobre.

Cochilco (2017a). Anuario de estadísticas del cobre y otros minerales 1997-2016. Comisión Chilena del Cobre.

Cochilco. (2017b). Proyección de consumo de agua en la minería del cobre 2017-2028. DEPP 22/2017. Comisión Chilena del Cobre.

Cochilco. (2017c). Consumo de agua en la minería del cobre al 2016. DEPP11/2017. Comisión Chilena del Cobre.

Codelco. (2011). Uso Eficiente de Energía. Recuperado de https://www.codelco.com/uso-eficiente-de-energia/prontus_codelco/2011-04-03/162550.html

Codelco. (2011). Reporte de Sustentabilidad 2010. Recuperado de [https://www.codelco.com/flipbook/reporte_sustentabilidad/2010/Reporte-Codelco-2010-\(Jul\).pdf](https://www.codelco.com/flipbook/reporte_sustentabilidad/2010/Reporte-Codelco-2010-(Jul).pdf)

Codelco. (2012). Reporte de Sustentabilidad 2011. Recuperado de https://www.codelco.com/prontus_codelco/site/artic/20120530/asocfile/20120530115150/reporte_codelco_2011_mayo_baja.pdf

Codelco. (2013). Reporte de Sustentabilidad 2012. Recuperado de <https://www.codelco.com/reporte2012/>

Codelco. (2014). Reporte de Sustentabilidad 2013. Recuperado de <https://www.codelco.com/nuestro-desempeno-en-sustentabilidad/reporte2013/2013-04-23/101940.html>

Codelco. (2015). Reporte de Sustentabilidad 2014. Recuperado de <https://www.codelco.com/reporte2014/site/edic/base/port/inicio.html>

Codelco. (2016). Reporte de Sustentabilidad 2015. Recuperado de <https://www.codelco.com/memoria2015/pdf/reporte-sustentabilidad/reporte-sustentabilidad-codelco-2015.pdf>

Codelco. (2017). Reporte de Sustentabilidad 2016. Recuperado de <https://www.codelco.com/memoria2016/pdf/reporte-sustentabilidad/reporte-sustentabilidad-2016.pdf>

Crowson, P. (2012). Some observations on copper yields and ore grades. *Resources Policy* 37 (1), 59-72.

Elshkaki, A., Graedel, T., Ciacci, L., Reck, B. (2016). Copper demand, supply, and associated energy use to 2050. *Global Environmental Change*, 39, 305-315.

European Copper Institute (2018). Processes: copper mining and production. Recuperado de <https://copperalliance.eu/about-copper/copper-and-its-alloys/processes/>

GRI. (2016a). GRI 302: ENERGY 2016. Recuperado de <https://www.globalreporting.org/standards/media/1009/gri-302-energy-2016.pdf>

GRI. (2016b). GRI 305: EMISSIONS 2016. Recuperado de <https://www.globalreporting.org/standards/media/1012/gri-305-emissions-2016.pdf>

GRI. (2018). GRI 303: Water and Effluents. Recuperado de <https://www.globalreporting.org/standards/media/1909/gri-303-water-and-effluents-2018.pdf>

Gunson, A., Klein, B., Veiga, M., Dunbar, S. (2012). Reducing mine water requirements. *Journal of Cleaner Production*, 21, 71-82.

ICA. (2017). Copper Environmental Profile. Recuperado de <http://copperalliance.org/wordpress/wp-content/uploads/2017/12/ICA-EnvironmentalProfileHESD-201709-FINAL-LOWRES-1-1.pdf>

ICSG. (2016). International Copper Study Group. Copper Factbook.

Jacob, W., Cooper, D., Gutowski, T. & Ramoz-Grez, J. (2017). The efficiency of copper ore comminution: A thermodynamic exergy analysis. *Minerals Engineering*, 109, 21-31.

Koppelaar, R. & Koppelaar, H. (2016). The Ore Grade and Depth Influence on Copper Energy Inputs. *BioPhysical Economics and Resource Quality*, 1(2), 1-16.

Lagos, G., Peters, D., Videla, A. & Jara, J. (2018). The Effect of mine aging on the evolution of environmental footprint indicators in the Chilean copper mining industry 2001-2015. *Journal of Cleaner Production*, 174, 389-400.

Lundin Mining. (2016). Sustainability Report 2015. Recuperado de https://www.lundinmining.com/site/assets/files/3623/lundinmining_csr15.pdf

Lundin Mining. (2017). Sustainability Report 2016. Recuperado de https://www.lundinmining.com/site/assets/files/3622/lmc_csr2016_final_web_rev_lr_sp_reads.pdf

Minera Escondida. (2013). Informe de Sustentabilidad 2012. Recuperado de <http://accionempresas.cl/docs/empresas/mineraescondidainformesustentabilidad2012.pdf>

Minera Escondida. (2013). Informe de Sustentabilidad 2012. Recuperado de http://accionempresas.cl/docs/empresas/1610024512_Informe_de_sustentabilidad_Escondida_2013.pdf

Minería Chilena (2009). Recuperado de <http://www.mch.cl/reportajes/el-consumo-especifico-de-energia/#>

Minería Chilena (2018). Recuperado de <http://www.mch.cl/2018/06/06/tribunal-ambiental-confirma-sancion-de-2-798-millones-contra-minera-candelaria/>

Ministerio de Energía Gobierno de Chile. (2017) Balance Nacional de Energía 2015. Santiago de Chile

Norgate, T. & Rankin, W., (2000). Life cycle assessment of copper and nickel production. In: Proceedings of MINPREX 2000, AusIMM, Melbourne, 133-138.

Norgate, T., Jahanshahi, S. & Rankin, W. (2006). Assessing the environmental impact of metal production processes. *Journal of Cleaner Production*, 15, 838-848.

Norgate, T. Haque, N. (2010). Energy and greenhouse gas impacts of mining and mineral processing operations. *Journal of Cleaner Production*, 18, 266-274.

Northey, S., Haque, N. & Mudd, G., (2013). Using sustainability reporting to assess the environmental footprint of copper mining. *Journal of Cleaner Production*, 40, 118-128.

Northey, S., Mohr, S., Mudd, G., Weng, Z. & Giurco, D. (2014). Modelling future copper ore grade decline based on a detailed assessment of copper resources and mining. *Resources, Conservation and Recycling*, 83, 190-201.

Nueva Minería y Energía. (2016). Recuperado de <http://www.nuevamineria.com/revista/las-tendencias-en-recuperacion-de-agua/>

Page, N. & Creasey, S. (1975). Ore grade, metal production, and energy. *Journal of Research of the U. S. Geological Survey*, 3, 9-13.

Pacheco, L., Durán., M. Uso del agua en la industria minera. Parte 2: Estudio de opciones para reciclar el agua de proceso. *Tecnología, Ciencia, Educación*, 22, 15-29.

Pino, F. (2011). Combinación de Tecnologías de Manejo de Relaves – Disminución del Consumo de Agua. Seminario 2011 de Relaves en Pasta.

U.S. Geological Survey (USGS). (2012). Estimated Water Requirements for the Conventional Flotation of Copper Ores. Recuperado de <https://pubs.usgs.gov/of/2012/1089/pdf/ofr2012-1089.pdf>

Wels, C., Roberston, A. (2003). Conceptual model for estimating water recovery in tailings impoundments. Recuperado de <https://robertsongeoconsultants.com/files/publications/welcmf.pdf>

ANEXOS

**ANEXO A : ARTÍCULO ENVIADO A JOURNAL OF CLEANER
PRODUCTION “THE EFFECT OF ORE GRADE ON ENERGY
AND WATER CONSUMPTION, AND GHG EMISSIONS IN
COPPER MINING.”**

The effect of ore grade on energy consumption, water consumption and greenhouse gas emissions in copper mining.

Javier Cejas^{a1}, Gustavo Lagos^a.

^a Department of Mining Engineering, Pontificia Universidad Católica de Chile, Av. Vicuña Mackenna 4860, Macul, Santiago, Chile

Abstract

Numerous investigations support that the average copper ore grade in operating deposits of this metal has been decreasing globally over time and that this trend will continue. This is a key factor in the increase of the environmental footprint when it is measured in terms of water withdrawal, energy consumption and greenhouse gas emissions. In 2015, 81% of total mine copper global production was obtained in concentrator plants with sulfide ore feed and copper concentrates as product. The concentrate grade is approximately thirty times higher than the concentrator feed. In this paper, models are developed to estimate energy and water consumption as well as greenhouse gas (GHG) emissions, as a function of concentrator feed ore grade. The analysis is carried out for ten Chilean open-pit mines which represented 67% of Chile's copper production between 2010 and 2016. The models developed include scopes one, two and three of a Life Cycle Analysis.

Keywords: GHG Emissions; mining; water; energy; environmental footprint; LCA

¹ Corresponding author.

E-mail addresses: jicejas@uc.cl (J. Cejas), glagos@ing.puc.cl (G. Lagos)

1. Introduction

Mining companies are constantly forced to improve the efficiency of resource extraction and reduce the environmental footprint (Norgate, Jahanshahi & Rankin, 2007) mainly because given natural factors are detrimental over time, the reduction of ore grades in deposits and greater pit depths results in larger rock hardness and longer transport routes. (Crowson, 2012; Lagos, Peters, Videla & Jara, 2018). One way of performing a quantitative diagnostic of this problem is with life cycle analysis (LCA) which allows the identification of the best opportunities to reduce the environmental impacts that make up this footprint (Northey, Haque & Mudd, 2013).

Ore grade reduction implies mining and processing a greater amount of ore to obtain the same amount of metal, resulting in higher processing costs (Calvo, Mudd, Valero & Valero, 2016). The reduction of the ore grades is possibly one of the main factors that influence the environmental impact of copper production (Norgate et al., 2007). Some of these factors are the removal of a greater amount of waste material, greater generation and deposition of tailing, prolonged disruption of the adjacent sector of the mining operation, increased consumption of electric energy, explosives, diesel, water and other supplies (Northey, Mohr, Mudd, Weng, & Giurco, 2014).

The relation of copper grade with energy consumption, greenhouse gas emissions (GHG) and/or fresh water consumption was studied by several authors (Norgate & Haque, 2010; Northey et al., 2013; Northey et al., 2014; Calvo et al., 2016; Elshkaki, Graedel, Ciacci & Reck, 2016). These variables are considered fundamental in the environmental footprint for different reasons. First, GHG emissions have global importance and the methodology for measuring them is well established (GRI, 2016b). Energy also has universally accepted measurement methods. Energy is of global importance when produced by the combustion of fossil fuels (GRI, 2016a); water is of key local importance due to its increasing shortage, but also due to its management, treatment, recirculation and disposal in most of the planet (U.S. Geological Survey, 2012, Embid & Martín, 2017).

The extraction of copper can be carried out from underground mines and from open-pits, according to the European Copper Institute (2018), about 90% of the ore worldwide is

mined by open-pit methods. In fact, in 2015, open-pit mining contributed 86% of the Chilean production (Lagos et al., 2018; Cochilco, 2017a).

The main processes in the extraction of copper are hydrometallurgy, which consists of leaching, solvent extraction, and electrowinning, and the traditional process, which entails crushing, comminution and concentration, followed by smelting and electrorefining (Northey et al., 2013). Hydrometallurgy is generally used for the treatment of oxidized ore. The traditional process is applied, usually, to process copper sulfides, which represented 81% of world production in 2015 (ICSG, 2016).

The scope of this study is limited to large open-pit operations whose main product is copper concentrate. Once the ore is concentrated, the emissions from the downstream processes are not affected by the ore grade (Northey et al., 2013, Northey et al., 2007). The objective of this article is to define relationships between the ore grade, energy consumption, water consumption, and GHG emissions. These relationships include the direct consumption and emissions that occur in the mines and their facilities, also known as scope one; the indirect consumption and emissions that correspond to electricity production, also known as scope number two; and scope three impacts consisting of the consumption and emissions related to the production and transport of supplies required by electricity and mining production. Data was extracted from the sustainability reports and other documents of the ten mines selected. Results are discussed emphasizing the causes of the reported differences of the variables. These variables are also compared with the average of the mines and for the years considered.

The following section describes the methodology and estimations. In section three, the results obtained for direct and indirect energy, GHG and water consumption are analyzed and discussed. Finally, section four contains the conclusions.

2. Methodology

The data considered was compiled from the sustainability and financial reports from 2010 to 2016 of the Los Pelambres, Centinela, Los Bronces, Collahuasi, El Soldado, Escondida, Sierra Gorda, Ministro Hales, Andina and Candelaria mines, as they represented about 67% of the Chilean copper production contained in concentrates in 2016 (Cochilco,

2017a). The registered information corresponds to the copper grade, production, consumption of direct and indirect energy, consumption of fresh water and GHG emissions of scope 1 and 2, and 3 in some cases.

The terms direct and scope 1, refer to the use, consumption, and emissions of materials and consumables in the mine and the concentrator. Indirect use consumption and emissions, are also denominated scope 2, and are related with electricity generation. Scope 3 consumption and emissions, correspond to the production and transport of consumables and materials required by the mining and processing operations (Cochilco, 2016).

Table 1 shows the average of each value for each of the mine sites. The grid mix that provides the electricity to each operation belongs to the Sistema Interconectado del Norte Grande, SING, or the Sistema Interconectado Central, SIC, the years considered, as well as the discussion regarding the dispersion and large variability of the data will be developed between sections 3.1 through 3.4.

Table 1 Average values per mine site of different efficiency indicators

Mine/Item	Ore Grade (%)	Direct energy (GJ/t Cu)	Indirect energy (GJ/t Cu)	Grid mix	Water withdrawal (m ³ /t Cu)	GHG 1 (t Co ₂ /t Cu)	GHG 2 (t Co ₂ /t Cu)	GHG 3 (t Co ₂ /t Cu)	Years
Pelambres	0.72	6.80	11.91	SIC	52	0.45	1.27	-	2010-2016
Centinela	0.63	21.91	19.47	SING	117	1.40	4.51	0.22	2011-2016
Los Bronces	0.85	10.07	16.17	SIC	75	0.75	1.44	-	2010-2016
Collahuasi	1.05	13.64	10.89	SING	79	1.20	2.32	0.92	2010-2016
El Soldado	0.76	32.15	21.78	SING	115	2.51	2.47	-	2010-2016

Escondida	1.17	12.69	11.36	SING	88	1.01	2.70	-	2010-2016
Sierra Gorda	0.36	49.89	41.52	SING	542	3.91	-	-	2015-2016
Ministro Hales	1.40	21.12	7.63	SING	91	1.46	1.79	-	2013-2016
Andina	0.80	6.63	12.14	SIC	143	0.45	0.94	-	2010-2016
Candelaria	0.67	21.26	21.75	SIC	213	1.60	2.01	0.05	2014-2016

Direct energy (E_d) corresponds to fuel consumption, while indirect energy (E_i) is the primary energy used to produce electricity required by mining and processing operations (Codelco, 2011a).

Total water consumption (w_t) is equal to recycled and reused water (w_r), plus new water (w_c), plus water used to produce consumables for mining and processing (w_i) (Lagos et al., 2018). New water may come from different sources including superficial, underground, ocean and third parties (GRI, 2018).

$$w_t = w_r + w_c + w_i \quad (1)$$

For the estimation of scope 1 emissions, the unit direct energy consumption is multiplied by a diesel emission factor ($77.4 \frac{\text{kg CO}_2}{\text{GJ}}$). Diesel represents more than 80% of the fuel consumed by Chilean mining operations, according to the Ministry of Energy of the Government of Chile (2017).

$$GHG_1 \left(\frac{\text{t CO}_2}{\text{t Cu}} \right) = 0.0774 E_d \quad (2)$$

Scope 2 results from considering the emission factor of the SING or SIC of each year as appropriate to each mine operation considered in this study. The global emission factor when carrying out the weighting of production on the data collected is $0.17 \frac{\text{t CO}_2}{\text{GJ}}$. This estimate tends to be slightly higher than the average of the selected data, because some

operations considered obtain electric power from non-conventional renewable energies (NCRE).

$$GHG_2 \left(\frac{t CO_2}{t Cu} \right) = \frac{\sum_{j,k} f_{j,k} P_{j,k}}{\sum_{j,k} P_{j,k}} E_i \quad (3)$$

Where $f_{j,k}$ is the emission factor of the interconnected system j for the year k and $P_{j,k}$ the production of copper produced in the interconnected system j in the year k .

It should be mentioned that most of the companies report this information in accordance with the Global Reporting Initiative (GRI) guidelines. However, in those cases where the report follows local norms, such as reporting the volume of fuel used instead of direct energy, consistent estimations were made for the consideration of the calorific value of each energy input. In addition, in the case of the operations in which part of the exploitation is performed in an underground way, like in the case of Andina, the indicators are recalculated considering:

$$\Psi_i = \frac{\psi_i - P_j u\% f_{i,j}}{P_j} \quad (4)$$

Where Ψ_i is the adjusted information, ψ_i the information reported by the companies, P_j the production of the year j , $u\%$ the percentage of production obtained through underground mining and $f_{i,j}$ the unitary factor of transformation of indicator i for the year j according to Cochilco (2017a). In the case of operations that in addition to the production of copper concentrate also produce cathodes due to the oxide processing, as in Collahuasi, Escondida and Los Bronces, the adjustment was made by:

$$\Psi_i = \frac{\psi_i - S_j f_{i,j}}{P_j} \quad (5)$$

Where S_j corresponds to the copper production through SX/EW for the year j .

Scope 3 emissions are barely reported, so the approach for its estimation was based on the modeling of the LCA of the copper concentrate using the software GaBi 8 from Thinkstep, considering the main supplies for the mining and concentration corresponding to explosives, acids and additives, diesel production, water transport and production of supplies for the generation of electricity (ICA, 2017). GaBi 8 has an extensive database that allows incorporating the life cycle analysis of each supply for copper production. In

addition, it delivers the results of the impact of life cycle analysis (LCIA) of the joint production.

3. Results

3.1 Direct and indirect energy

The models developed in this paper are based on work carried out by Page and Creasey (1975), Northey, Haque and Mudd (2013) and Koppelaar and Koppelaar (2016). They propose potential models to explain the relationship between copper ore grade and the energy consumption per ton of metal produced. Northey et al. (2013) separate the energy consumption estimation for hydrometallurgy and concentration processes.

The model proposed by Koppelaar and Koppelaar (2016) includes direct and indirect energy in aggregate form, which constitutes a modification of the Page and Creasey model (1975), which explains the mass effect of the ore grade on energy consumption. In this paper, disaggregated equations for direct and indirect energy are presented.

$$E_r \left(\frac{GJ}{t Cu} \right) = \alpha_r + \beta_r g^{\epsilon_r} \quad (6)$$

Where r is the direct or indirect energy, and g is the copper ore grade.

The α parameter proposed by Koppelaar and Koppelaar (2016) corresponds to the minimum energy required to obtain the copper contained in the concentrate. It is also the asymptote of the model, meaning that when the ore grade increases to a high value, the energy tends to equal the value of α . If the ore grade is high enough, the value of α considers only the energy for fuel burning required to transport the material and, therefore, α . For this reason, in the case of indirect energy $\alpha = 0$.

The parameter β (Norgate, 2000) is the amount of energy, whether direct or indirect, required to produce copper contained in the concentrate. Also, ϵ represents the mass effect of the ore grade. Therefore, for both, direct and indirect energy, this parameter takes the value of -1.

Figures 1 and 2 show the results for direct and indirect energy per ton of copper contained in concentrates, versus ore grade, for ten Chilean copper mines. It can be observed that there is a potential behavior in which the lower the ore grade the greater the consumption and vice versa. Equation 7 shows the relationship between the average direct energy per

ton of copper produced in these mines and the ore grade, while equation 8 shows the relationship between the average indirect energy per ton of copper produced and the ore grade.

$$E_d \left(\frac{GJ}{t Cu} \right) = 4 + \frac{10.7}{g} \quad R^2 = 0.42 \quad (7)$$

$$E_i \left(\frac{GJ}{t Cu} \right) = \frac{12.4}{g} \quad R^2 = 0.74 \quad (8)$$

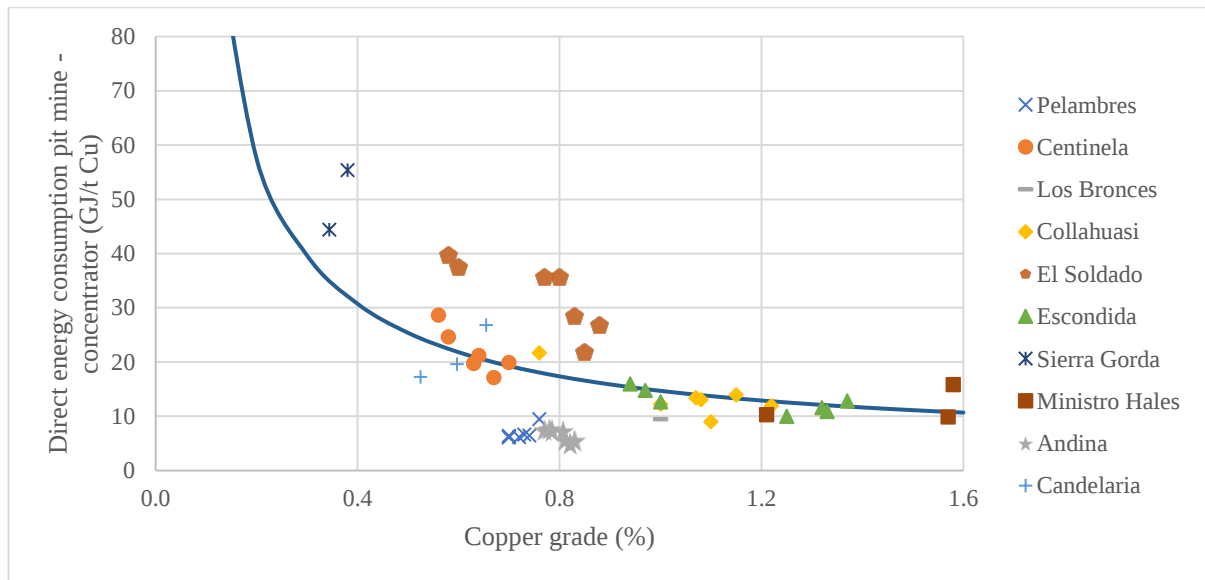


Figure 1 Direct energy per ton of copper produced consumption vs head grade

The difference in direct energy consumption between two mines with similar ore grades reaches up to 380% in the case of El Soldado and Pelambres. There are many factors explaining the differences. In the case of El Soldado pit, there is greater depth and lower tonnage trucks are used; however, in Minera Los Pelambres, the pit is less deep, they have an online monitoring system for their trucks, and they decreased the power usage by 4% (Antofagasta Minerals, 2016b). Los Bronces mine, which has one of the lowest direct energy consumptions per ton of copper produced, has managed to reduce its diesel consumption due to the incorporation of larger tonnage truck fleets and due to the optimization of queues and down times of its transport fleet (Anglo American, 2017b). More than 90% of diesel use in open pit mines in Chile is consumed by truck fleets.

It is possible to observe in Figures 1 and 2 that ore grade has a high correlation with energy consumption as noted by Norgate, Jahanshahi and Rankin (2007). Energy consumption is not dependent on other factors, such as the particle size, according to Jacob, Cooper, Gutowski and Ramoz-Grez (2017), or the specific energy of comminution (Ballantyne & Powell, 2014) or pit depth (Koppelaar & Koppelaar, 2016).

Differences of indirect energy consumption for operations with similar ore grades can reach up to 200% and can be explained by the greater or lesser hardness of the ore, as shown by a value 50% larger for electric energy consumption per ton of contained copper, of operations in the central and south of Chile (SIC electric grid) as opposed to those in Antofagasta and Tarapacá regions (SING electric grid) (Minería Chilena, 2009).

Crushing, milling and flotation consume on average 7%, 68% and 25% of the energy consumed in a concentrator plant, respectively. This is obtained after compiling the estimates made by Mardsen (2008), Rankin (2011), Armas and Poma (2013), Koppelaar

and Koppelaar (2016) and data available from the Candelaria, El Soldado and Los Bronces mines. According to these sources, the energy consumed in crushing varies between 3.6 and 9 MJ/t of ore; the energy consumed in milling varies between 68 and 81 MJ/t of ore, and the rest of the processes, including flotation, classification, transport of pulp and water management within the plant, consume between 18 and 25 MJ/t of ore. Taking this into consideration, the total energy requirements in GJ per ton of copper contained in the concentrate can be expressed by the following equations:

$$E_{Mine} \left(\frac{GJ}{t Cu} \right) = 3.7 + \frac{10.1}{g} \quad (9)$$

$$E_{Crushing} \left(\frac{GJ}{t Cu} \right) = \frac{0.9}{g} \quad (10)$$

$$E_{Mill} \left(\frac{GJ}{t Cu} \right) = 0.2 + \frac{8.8}{g} \quad (11)$$

$$E_{Flotation} \left(\frac{GJ}{t Cu} \right) = 0.1 + \frac{3.3}{g} \quad (12)$$

It should be noted that the contribution of parameter α in the case of the energy required in the crushing process is negligible, so it was considered equal to 0.

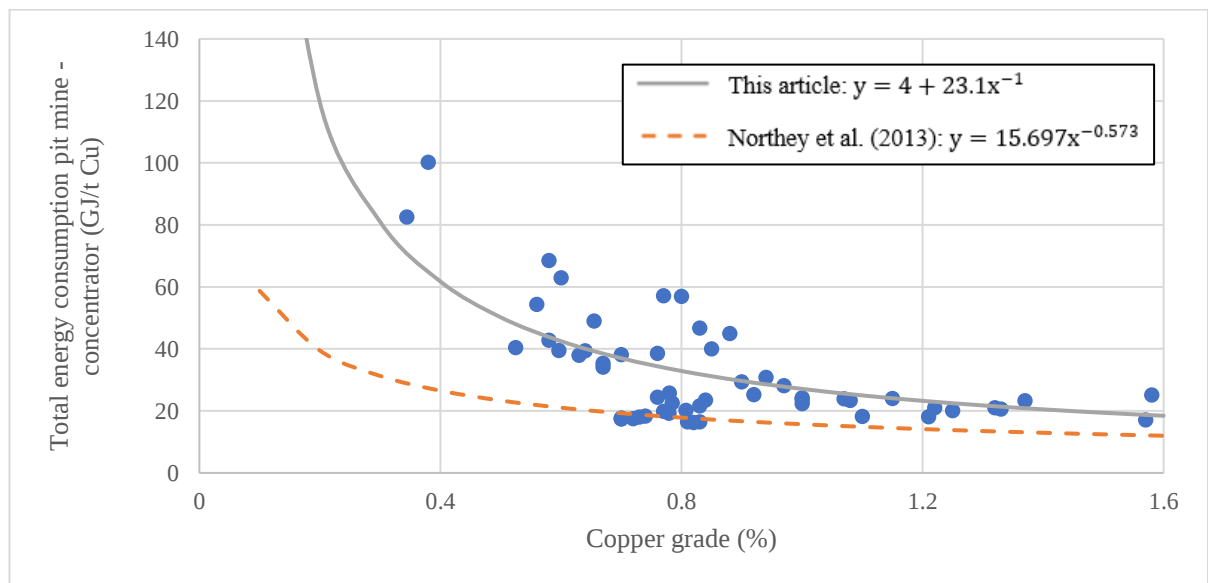


Figure 3 Comparison of models by Northey et al. (2013) and of this paper respect to the current data

Figure 3 shows that the model of Northey et al. (2013) predicts lower values of total energy consumed in the mine and in the concentrator than those reported in this paper (upper and

continuous line). This occurs first because Northey et al. (2013) adds data from open-pit and underground mines. For the latter, the total energy consumption per unit of copper contained produced is 40.7% of the energy required in open-pit mines in 2016 (Cochilco, 2017a). Also, the data used by Northey et al. (2013) is older (1991-2010) than the data considered in this paper (2010-2016), and it may be expected that more recent data corresponds to lower ore grades (Mudd, Weng, Memary, Northey, Giurco, Mohr & Mason, 2012; Lagos et al, 2018).

3.2 Water consumption

In addition, operational parameters are included, such as the recirculation rate, which is the amount of water reused divided by the total water used. This rate can, theoretically, vary between 0% and 100% but cannot reach the latter value since part of the water is lost in filtrations, evaporation and retention in tails (Cochilco, 2017c). According to Wels and Roberston (2003), 52% of the total water deposited in the tailing evaporates, while losses due to leaks and water retained by the material amount to 17% and 11%, respectively. These losses are in a range between 0.35 and 0.65 m³/t of pulp (Nueva Minería y Energía, 2016). In addition, the commercialization of concentrate is usually carried out with a humidity between 8% and 12% (Chaparro, 2009) decreasing even more the recirculation potential. However, there are available technologies that allow increasing the recirculation rates. One example is the classification of tailings in hydrocyclones (Nueva Minería y Energía, 2016) that allows separating the sands by sending them to the dam wall, and unloading the slats inside the wall (Pino, 2011); another example is the use of thickeners which can recover, on average, the equivalent of 50% of the recirculation rate depending on the type of ore and on the design (Pacheco & Durán, 2007). In 2016, Chilean concentration plants registered a recirculation rate of 71% (Cochilco, 2017c), and it is estimated that the majority of this came from the tailings dams (Gunson, Klein, Veiga & Dunbar, 2012).

Equation 13 relates the fresh water consumption with the amount of water required to process the ore and with other parameters of the operation.

$$w_c \left(\frac{m^3}{t \text{ Cu}} \right) = \frac{w_p(1-R)}{F_R g} \quad (13)$$

humidity of the geographical location and the consequent evaporation at the tailings dams, the availability of water in the area, and the efficiency of water management.

3.3 Scope 1 and 2 greenhouse gases

Figure 5 shows GHG direct and indirect emissions per ton of copper for each of the mines of the study, and the average emissions (continuous line) obtained with equations 15 and 16, respectively. It is observed that the scope 1 GHG emissions have a dispersion similar to direct energy consumption (Figure 1) since each point can be obtained directly with the fuel emission factors used by each one of the operations. In contrast, scope 2 emissions show much more dispersion than Figure 2 because not all mines are in the same grid system, so the emission factors are different depending on the geographical location and on year. Furthermore, as mentioned above, part of the indirect energy requirement is generated by operations that incorporated NCRE energy sources during the period, such as Pelambres.

$$GHG_1 \left(\frac{t \text{ CO}_2}{t \text{ Cu}} \right) = 0.3 + \frac{0.83}{g} \quad (15)$$

$$GHG_2 \left(\frac{t \text{ CO}_2}{t \text{ Cu}} \right) = \frac{2.1}{g} \quad (16)$$

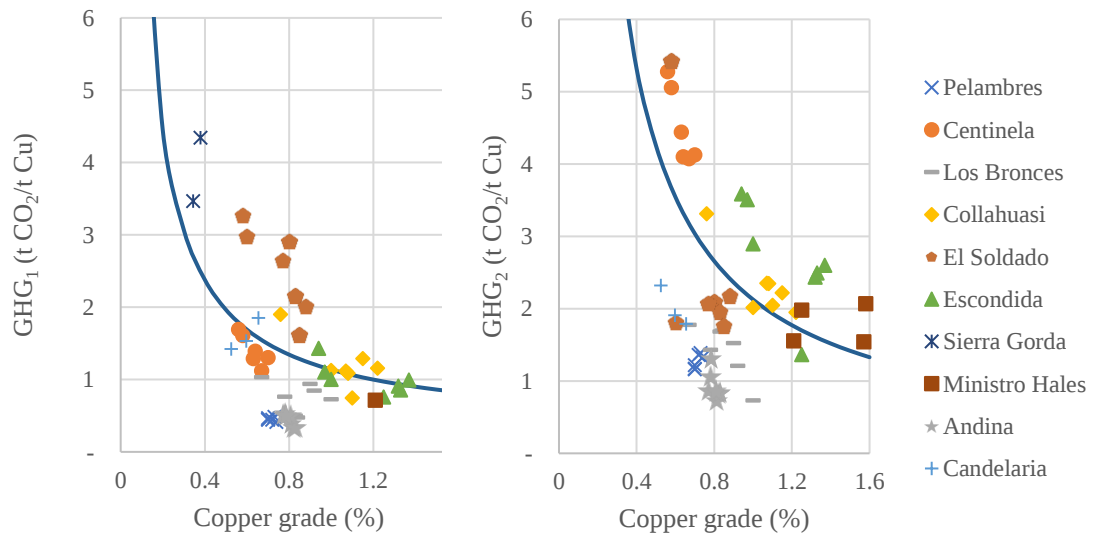


Figure 5 Scope 1 GHG emissions (left) and scope 2 (right) per ton of copper produced versus head grade

3.4 Scope 3 greenhouse gases and LCIA

To complete the GHG emissions estimation, scope 3 emissions were calculated using the GaBi 8 software, which models relevant consumables (see Table 2) for ore grades from 0.2% to 1.6%.

The relevant supplies according to the International Copper Association, ICA (2017) to produce concentrate are copper sulfide ore, explosives, limestone, sulfuric acid, water, diesel, electricity, among others (Table 2). To estimate the amount of these supplies, a comparison between the figures reported by ICA (2017) and the figures of the ten mines of this study was made, using the financial and sustainability report of the corresponding companies. Since the average grade of the ICA study (2017) was 0.6% and the average grade of the sample of this paper is 0.9%, an adjustment of the values was made using equations 7, 8 and 14.

Table 2 Relevant inputs to produce one ton of copper in 2016 for 0.6% ore grade

Supply	Amount
Ore (Sulfide)	140 t
Waste	180 t
Explosives	154 kg
Lime	102 kg
Limestone	135 kg
Sulfuric acid	16 kg
Auxiliary material	60 kg
Water	225 m ³
Diesel	398 kg
Electricity	22.6 GJ
Gasoline	0.48 kg
HFO	1.67 kg
Natural gas	360 MJ

The scope 3 emissions per ton of ore product of the modeling with GaBi 8 are shown in Table 3.

Table 3 Emission factors (scope 3) for main supplies for open-pit mine operations plus concentrator per ton of copper contained in concentrate according to GaBi modeling

Supply	Emissions (kg CO ₂ /t Ore)
Electricity	433
Reactants	112
Explosives	108
Fuel	58
Others	23

Table 4 shows the average energy requirements and emissions per ton of copper for an ore grade of 0.9%, estimated with equations 7, 8, 15 and 16, as well as with GaBi 8. Table 5 shows the sum of direct and indirect energy used in each of the stages of processing that emerges from equations 9 to 12.

Table 4 Energy and GHG emissions per ton of copper for each scope for the average grade studied

Energy	Amount	Emissions	Amount
E ₁	15.9 GJ/t Cu	GHG ₁	1.2 t CO ₂ /t Cu
E ₂	13.8 GJ/t Cu	GHG ₂	2.3 t CO ₂ /t Cu
E ₃	8.6 GJ/t Cu	GHG ₃	0.8 t CO ₂ /t Cu

Table 5 Process energy (direct + indirect) for each unitary operation per ton of copper for 0.9% ore grade

Energy	Amount
E _{Mine}	14.9 GJ/t Cu
E _{Crushing}	1 GJ/t Cu
E _{Mill}	10 GJ/t Cu
E _{Flotation}	3.8 GJ/t Cu

Finally, the results of the LCIA are shown in Table 6, which are the result of modeling with GaBi 8 for a ton of copper contained in concentrates, with an ore grade of 0.6% used

by ICA (2017). The LCIA values are similar to those calculated by ICA (2017), as can be observed. There is a 1% of difference for the acidification potential (AP), 15% for the eutrophication potential (EP), 75% for the ozone depletion potential (ODP) and 14% for the photochemical ozone creation potential (POCP). A general distinction between the ICA and the calculations in this paper for these variables is that only open pit mines were considered in the former. A smaller value for ODP may be explained by the scarce consumption of substances that generate ODP in Chile, less than 1% of global consumption in 2013 (Knoema, 2018). The value of POCP may be smaller for Chilean mines compared to globally distributed mines because the former is at a greater distance from cities, therefore emissions of NO_x may be smaller, on average, for Chilean mines.

Table 6 LCIA results per ton of copper for 0.6% ore grade

Item	This paper	ICA (2017)
AP	28.9 kg SO ₂	29.3 kg SO ₂
EP	3 kg PO ₄ ³⁻	2.6 kg PO ₄ ³⁻
ODP	1.5 e-8 kg CFC-11	6.1 e-8 kg CFC-11
POCP	1.8 kg C ₂ H ₄	2.1 kg C ₂ H ₄

4. Conclusions

The models that explain the dependence of direct and indirect energy consumption and water consumption, as well as scopes one, two and three of GHG emissions dependence on ore grade, are of similar nature and form. This confirms the conjectures of many authors about the importance of copper ore grade on the environmental footprint of mining.

When comparing the results of two mines with similar ore grade, the maximum difference of direct energy consumption per ton of copper produced was 380%; this difference for indirect energy was 200%. The former is reflected in the difference for GHG direct emissions per ton of copper produced which was 600%. The difference found for GHG indirect emissions was much larger than the one indicated for indirect energy, because

electric power was originated from different grids, and SING is much more dependent on fossil fuels than SIC. The GHG direct emissions difference is more complex to explain since it depends on factors such as pit depth, technological factors such as truck size, and management decisions.

Over one half of GHG emitted by the ten mines in the period studied were a consequence of electricity production, 27% were related to direct energy consumption, and 19% were emitted by production and transport processes of required supplies (scope 3). Close to 60% of the latter emissions are associated with electricity production.

In terms of water consumption per ton of copper produced, differences up to 260% were observed for mines with approximately the same ore grade. This happens mainly because the recirculation rate is very variable between mines, with values from 50% up to 85%.

These results show that the more obvious way to dramatically reduce the GHG emissions per ton of copper content in concentrate is to install non-conventional renewable energy power plants that replace the energy sources based on fossil fuels. This would also result in a substantial reduction of scope 3 GHG emissions.

5. Acknowledgements

This research was possible thanks to the graduate scholarship program granted by the Department of Mining Engineering of the Pontificia Universidad Catolica de Chile. We specially thank comments and support of Professor Juan Carlos Salas of the Mining Engineering Department of the Pontificia Universidad Catolica de Chile and Paul Maidstone of the Sustainability Management of Codelco.

6. References

- Anglo American. (2011a) Reporte de sustentabilidad 2010. Recovered from https://chile.angloamerican.com/~media/Files/A/Anglo-American-Chile-V2/reports-and-presentations/chile_sd_report_2010_sp.pdf
- Anglo American. (2011b). Annual report 2010. Recovered from <https://www.angloamerican.com/~media/Files/A/Anglo-American-PLC-V2/investors/reports/aa-annual-report-2011.pdf>
- Anglo American. (2012a) Reporte de sustentabilidad 2011. Recovered from https://chile.angloamerican.com/~media/Files/A/Anglo-American-Chile-V2/reports-and-presentations/chile_sd_report_2011_sp.pdf
- Anglo American. (2012b). Annual report 2011. Recovered from <https://www.angloamerican.com/~media/Files/A/Anglo-American-PLC-V2/investors/reports/aa-annual-report-2011.pdf>
- Anglo American. (2013a) Reporte de sustentabilidad 2012. Recovered from https://chile.angloamerican.com/~media/Files/A/Anglo-American-Chile-V2/reports-and-presentations/chile_sd_report_2012_sp.pdf
- Anglo American. (2013b). Annual report 2012. Recovered from <https://www.angloamerican.com/~media/Files/A/Anglo-American-PLC-V2/investors/reports/annual-report2012.pdf>
- Anglo American. (2014a) Reporte de sustentabilidad 2013. Recovered from https://chile.angloamerican.com/~media/Files/A/Anglo-American-Chile-V2/reports-and-presentations/chile_sd_report_2013_sp.pdf
- Anglo American. (2014b). Annual report 2013. Recovered from <https://www.angloamerican.com/~media/Files/A/Anglo-American-PLC-V2/investors/reports/annual-report2013.pdf>
- Anglo American. (2015a) Reporte de sustentabilidad 2014. Recovered from https://chile.angloamerican.com/~media/Files/A/Anglo-American-Chile-V2/reports-and-presentations/chile_sd_report_2014_sp.pdf

- Anglo American. (2015b). Annual report 2014. Recovered from <https://www.angloamerican.com/~media/Files/A/Anglo-American-PLC-V2/documents/annual-reporting-2016/downloads/annual-report-2016-interactive-v2.pdf>
- Anglo American. (2016a) Reporte de sustentabilidad 2015. Recovered from https://chile.angloamerican.com/~media/Files/A/Anglo-American-Chile-V2/reports-and-presentations/chile_sd_report_2015_sp_2.pdf
- Anglo American. (2016b). Annual report 2015. Recovered from <https://www.angloamerican.com/~media/Files/A/Anglo-American-PLC-V2/documents/aa-ar-15.pdf>
- Anglo American. (2017a) Reporte de sustentabilidad 2016. Recovered from https://chile.angloamerican.com/~media/Files/A/Anglo-American-Chile-V2/reports-and-presentations/chile_sd_report_2016_sp.pdf
- Anglo American. (2017b). Reporte de avance del convenio de cooperación entre Ministerio de energía y Consejo minero. Available in <http://consejominero.cl/wp-content/themes/consejominero/img/angloamerican.pdf>
- Anglo American. (2017c). Annual report 2016. Recovered from <https://www.angloamerican.com/~media/Files/A/Anglo-American-PLC-V2/documents/annual-reporting-2016/downloads/annual-report-2016-interactive-v2.pdf>
- Antofagasta Minerals. (2011). Reporte de sustentabilidad 2010. Recovered from http://www.aminerals.cl/media/3629/antofagasta-minerals_reporte-de-sustentabilidad-antofagasta-plc-2010.pdf
- Antofagasta Minerals. (2014a). Reporte de sustentabilidad 2013. Recovered from <http://www.antofagasta.co.uk/media/2707/sustainability-report-2013-spanish-version.pdf>
- Antofagasta Minerals. (2014b). Gestión hídrica en minera Los Pelambres. Recovered from <http://www.jvriochoapa.cl/wp-content/uploads/2014/09/Presentaci%C3%B3n-Minera-Los-Pelambres.ppt>

Antofagasta Minerals. (2015). Reporte de sustentabilidad 2014. Recovered from http://www.aminerals.cl/media/3630/antofagasta-minerals_reporte-de-sustentabilidad-antofagasta-plc-2014.pdf

Antofagasta Minerals. (2016a). Reporte de sustentabilidad 2015. Recovered from http://www.aminerals.cl/media/3631/antofagasta-minerals_reporte-de-sustentabilidad-antofagasta-plc-2015.pdf

Antofagasta Minerals. (2016b). Reporte de avance del convenio de cooperación entre Ministerio de energía y Consejo minero. Available in <http://consejominero.cl/wp-content/themes/consejominero/img/amsa.pdf>

Antofagasta Minerals. (2017). Reporte de sustentabilidad 2016. Recovered from http://www.aminerals.cl/media/5534/antofagasta-minerals_rs16.pdf

BHP Billiton. (2012). BHP Billiton production report for the half year ended 31 December 2011. Recovered from https://www.bhp.com/-/media/bhp/documents/investors/reports/2012/120118_bhp-billiton-production-report-for-the-half-year-ended-31-december-2011.pdf

BHP Billiton. (2013). BHP Billiton production report for the half year ended 31 December 2012. Recovered from https://www.bhp.com/-/media/bhp/documents/investors/reports/2013/130123_bhp-billiton-production-report-for-the-half-year-ended-31-december-2012.pdf

BHP Billiton. (2014). BHP Billiton production report for the half year ended 31 December 2013. Recovered from https://www.bhp.com/-/media/bhp/documents/investors/news/2014/140122_bhpbillitonoperationalreviewforthehalfyearended31december2013.pdf

BHP Billiton. (2015a). BHP Billiton production report for the half year ended 31 December 2014. Recovered from https://www.bhp.com/-/media/bhp/documents/investors/news/2015/150121_bhpbillitonoperationalreviewforthehalfyearended31december2014.pdf

- BHP Billiton Chile. (2015b). Sustainability report 2014. Recovered from <https://www.bhp.com/-/media/bhp/documents/society/reports/2014/csr-eng150518sustainabilityreport2014bhpbillitonchileoperations.pdf>
- BHP Billiton. (2016a). BHP Billiton production report for the half year ended 31 December 2015. Recovered from https://www.bhp.com/-/media/bhp/documents/investors/reports/2016/160120_bhpbillitonoperationalreviewforthehalfyearended31december2015.pdf
- BHP Billiton Chile. (2016b). Sustainability report 2015. Recovered from https://www.bhp.com/-/media/bhp/documents/society/reports/2016/160509_sustainabilityreport2015_chileanoperations.pdf
- BHP Billiton. (2017a). BHP Billiton production report for the half year ended 31 December 2016. Recovered from https://www.bhp.com/-/media/documents/media/reports-and-presentations/2017/170125_bhpbillitonoperationalreviewforthehalfyearended31december2016.pdf?la=en
- BHP Billiton Chile. (2017b). Informe de sustentabilidad 2016. Recovered from https://www.bhp.com/-/media/documents/media/reports-and-presentations/2017/170807_bhpinformedesustentabilidadabhpcchile.pdf
- Ballantyne, G., Powell, M. (2014). Benchmarking comminution energy consumption for the processing of copper and gold ores. Minerals Engineering,
- Calvo, G., Mudd, G., Valero, A., Valero, A. (2016). Decreasing ore grades in global metallic mining: A theoretical issue or a global reality?. Resources, 5, 36.
- CDEC-SIC. (2013a). Operación real anual 2010. Recovered from <https://sic.coordinador.cl/wp-content/uploads/2013/08/10.xls>
- CDEC-SIC. (2013b). Operación real anual 2011. Recovered from <https://sic.coordinador.cl/wp-content/uploads/2013/08/11.xls>
- CDEC-SIC. (2013c). Operación real anual 2012. Recovered from <https://sic.coordinador.cl/wp-content/uploads/2013/08/12.xls>

- CDEC-SIC. (2014). Operación real anual 2013. Recovered from <https://sic.coordinador.cl/wp-content/uploads/2014/03/131.xls>
- CDEC-SIC. (2015). Operación real anual 2014. Recovered from <http://sic.coordinadorelectrico.cl/wp-content/uploads/2015/03/14.xls>
- CDEC-SIC. (2016). Operación real anual 2015. Recovered from <http://sic.coordinadorelectrico.cl/wp-content/uploads/2016/09/15.xlsx>
- CDEC-SIC. (2017). Operación real anual 2016. Recovered from <https://sic.coordinador.cl/wp-content/uploads/2017/01/16.xlsx>
- CDEC-SING. (2016). Informe trimestral CDEC-SING julio-septiembre 2016. Recovered from http://cdec2.cdec-sing.cl/pls/portal/cdec.pck_web_coord_elec.sp_pagina?p_id=5029#
- Cochilco (2016). Informe sobre las emisiones indirectas de gases de efecto invernadero al 2015. DEPP 23/2016. Comisión Chilena del Cobre.
- Cochilco (2017a). Anuario de estadísticas del cobre y otros minerales 1997-2016. Comisión Chilena del Cobre.
- Cochilco. (2017b). Proyección de consumo de agua en la minería del cobre 2017-2028. DEPP 22/2017. Comisión Chilena del Cobre.
- Cochilco. (2017c). Consumo de agua en la minería del cobre al 2016. DEPP11/2017. Comisión Chilena del Cobre.
- Codelco. (2011a). Uso eficiente de energía. Recovered from https://www.codelco.com/uso-eficiente-de-energia/prontus_codelco/2011-04-03/162550.html
- Codelco. (2011b). Reporte de sustentabilidad 2010. Recovered from [https://www.codelco.com/flipbook/reporte_sustentabilidad/2010/Reporte-Codelco-2010-\(Jul\).pdf](https://www.codelco.com/flipbook/reporte_sustentabilidad/2010/Reporte-Codelco-2010-(Jul).pdf)
- Codelco. (2012). Reporte de sustentabilidad 2011. Recovered from https://www.codelco.com/prontus_codelco/site/artic/20120530/asocfile/2012053011515_0/reporte_codelco_2011_mayo_baja.pdf

- Codelco. (2013). Reporte de sustentabilidad 2012. Recovered from <https://www.codelco.com/reporte2012/>
- Codelco. (2014). Reporte de sustentabilidad 2013. Recovered from <https://www.codelco.com/nuestro-desempeno-en-sustentabilidad/reporte2013/2013-04-23/101940.html>
- Codelco. (2015). Reporte de sustentabilidad 2014. Recovered from <https://www.codelco.com/reporte2014/site/edic/base/port/inicio.html>
- Codelco. (2016). Reporte de sustentabilidad 2015. Recovered from <https://www.codelco.com/memoria2015/pdf/reporte-sustentabilidad/reporte-sustentabilidad-codelco-2015.pdf>
- Codelco. (2017). Reporte de sustentabilidad 2016. Recovered from <https://www.codelco.com/memoria2016/pdf/reporte-sustentabilidad/reporte-sustentabilidad-2016.pdf>
- Crowson, P. (2012). Some observations on copper yields and ore grades. *Resources Policy* 37 (1), 59-72.
- Embid, A. & Martín, L. (2017). El nexo entre el agua, la energía y la alimentación en América Latina y el Caribe. *Recursos Naturales e Infraestructura*, 179.
- Elshkaki, A., Graedel, T., Ciacci, L. & Reck, B. (2016). Copper demand, supply, and associated energy use to 2050. *Global Environmental Change*, 39, 305-315.
- European Copper Institute. (2018). Processes: copper mining and production. Recovered from <https://copperalliance.eu/about-copper/copper-and-its-alloys/processes/>
- GRI. (2016a). GRI 302: Energy 2016. Recovered from <https://www.globalreporting.org/standards/media/1009/gri-302-energy-2016.pdf>
- GRI. (2016b). GRI 305: Emissions 2016. Recovered from <https://www.globalreporting.org/standards/media/1012/gri-305-emissions-2016.pdf>
- GRI. (2018). GRI 303: Water and effluents. Recovered from <https://www.globalreporting.org/standards/media/1909/gri-303-water-and-effluents-2018.pdf>

- Gunson, A., Klein, B., Veiga, M., Dunbar, S. (2012). Reducing mine water requirements. *Journal of Cleaner Production*, 21, 71-82.
- ICA. (2017). Copper environmental profile. Recovered from <http://copperalliance.org/wordpress/wp-content/uploads/2017/12/ICA-EnvironmentalProfileHESD-201709-FINAL-LOWRES-1-1.pdf>
- ICSG. (2016). International Copper Study Group. Copper Factbook.
- Jacob, W., Cooper, D., Gutowski, T. & Ramoz-Grez, J. (2017). The efficiency of copper ore comminution: A thermodynamic exergy analysis. *Minerals Engineering*, 109, 21-31.
- Knoema. (2018). Consumption of all ozone-depleting substances. Recovered from hyperlink <https://knoema.com/atlas/topics/Environment/Stratospheric-Ozone-Depletion/Consumption-of-ozone-depleting-substances?action=export&gadget=tranking-container>
- Koppelaar, R. & Koppelaar, H. (2016). The ore grade and depth influence on copper energy inputs. *BioPhysical Economics and Resource Quality*, 1(2), 1-16.
- Lagos, G., Peters, D., Videla, A. & Jara, J. (2018). The effect of mine aging on the evolution of environmental footprint indicators in the Chilean copper mining industry 2001-2015. *Journal of Cleaner Production*, 174, 389-400.
- Lundin Mining. (2016). Sustainability report 2015. Recovered from https://www.lundinmining.com/site/assets/files/3623/lundinmining_csr15.pdf
- Lundin Mining. (2017). Sustainability report 2016. Recovered from https://www.lundinmining.com/site/assets/files/3622/lmc_csr2016_final_web_rev_lr_sp_reads.pdf
- Minera Escondida. (2013). Informe de sustentabilidad 2012. Recovered from <http://accionempresas.cl/docs/empresas/mineraescondidainformesustentabilidad2012.pdf>
- Minera Escondida. (2013). Informe de sustentabilidad 2012. Recovered from http://accionempresas.cl/docs/empresas/1610024512_Informe_de_sustentabilidad_Escondida_2013.pdf
- Minería Chilena (2009). Recovered from <http://www.mch.cl/reportajes/el-consumo-especifico-de-energia/#>

- Minería Chilena (2018). Recovered from <http://www.mch.cl/2018/06/06/tribunal-ambiental-confirma-sancion-de-2-798-millones-contraminera-candelaria/>
- Ministerio de Energía Gobierno de Chile. (2017), Balance Nacional de Energía 2015. Santiago de Chile
- Mudd, G., Weng, Z., Memary, R., Northey, S., Giurco, D., Mohr, S. & Mason, L. (2012). Future greenhouse gas emissions from copper mining: Assessing clean energy scenarios. Prepared for CSIRO minerals down under flagship by Monash University and Institute for Sustainable Futures, UTS. ISBN 978-1-922173-48-5.
- Norgate, T. & Rankin, W., (2000). Life cycle assessment of copper and nickel production. In: Proceedings of MINPREX 2000, AusIMM, Melbourne, 133-138.
- Norgate, T., Jahanshahi, S. & Rankin, W. (2006). Assessing the environmental impact of metal production processes. *Journal of Cleaner Production*, 15, 838-848.
- Norgate, T. Haque, N. (2010). Energy and greenhouse gas impacts of mining and mineral processing operations. *Journal of Cleaner Production*, 18, 266-274.
- Northey, S., Haque, N. & Mudd, G., (2013). Using sustainability reporting to assess the environmental footprint of copper mining. *Journal of Cleaner Production*, 40, 118-128.
- Northey, S., Mohr, S., Mudd, G., Weng, Z. & Giurco, D. (2014). Modelling future copper ore grade decline based on a detailed assessment of copper resources and mining. *Resources, Conservation and Recycling*, 83, 190-201.
- Nueva Minería y Energía. (2016). Recovered from <http://www.nuevamineria.com/revista/las-tendencias-en-recuperacion-de-agua/>
- Page, N. & Creasey, S. (1975). Ore grade, metal production, and energy. *Journal of Research of the U. S. Geological Survey*, 3, 9-13.
- Pacheco, L., Durán, M. Uso del agua en la industria minera. Parte 2: Estudio de opciones para reciclar el agua de proceso. *Tecnología, Ciencia, Educación*, 22, 15-29.
- Pino, F. (2011). Combinación de tecnologías de manejo de relaves – Disminución del consumo de agua. Seminario 2011 de Relaves en Pasta

U.S. Geological Survey (USGS). (2012). Estimated water requirements for the conventional flotation of copper ores. Recovered from <https://pubs.usgs.gov/of/2012/1089/pdf/ofr2012-1089.pdf>

Wels, C., Roberston, A. (2003). Conceptual model for estimating water recovery in tailings impoundments. Recovered from [https://robertsongeoconsultants.com/files/publications/welcmf .pdf](https://robertsongeoconsultants.com/files/publications/welcmf.pdf)

ANEXO B : COMPLETE DATA BASE

Mine	Item	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Pelambres	Grade (%)	0.76	0.74	0.7	0.72	0.7	0.7	0.73
	Direct energy (GJ/t Cu)	9.51	6.50	6.23	6.19	6.12	6.40	6.67
	Indirect energy (GJ/t Cu)	14.92	11.82	11.25	11.34	11.34	11.34	11.34
	Water consumption (m3/t Cu)	54.06	49.42	54.46	51.51	52.30	52.30	52.30
	GHG 1 (t Co ₂ /t Cu)		0.41	0.45	0.44	0.44	0.47	0.48
	GHG 2 (t Co ₂ /t Cu)		1.33	1.22	1.36	1.16	1.17	1.39
Centinela	Grade (%)		0.56	0.67	0.64	0.70	0.58	0.63
	Direct energy (GJ/t Cu)		28.67	17.19	21.24	19.96	24.64	19.78
	Indirect energy (GJ/t Cu)		25.74	18.20	18.21	18.22	18.22	18.22
	Water consumption (m3/t Cu)		156.6	116.42	108.6	107.7	107	107
	GHG 1 (t Co ₂ /t Cu)		1.69	1.12	1.39	1.30	1.61	1.29
	GHG 2 (t Co ₂ /t Cu)		5.28	4.07	4.10	4.13	5.06	4.44
Los Bronces	Grade (%)	1.00	0.90	0.84	0.83	0.78	0.92	0.67
	Direct energy (GJ/t Cu)	9.52	12.33	6.35	6.75	10.26	11.36	13.93
	Indirect energy (GJ/t Cu)	14.25	17.12	17.12	14.93	15.57	13.94	20.24
	Water consumption (m3/t Cu)	77.47	78.23	64.32	64.16	59.07	69.21	110.4
	GHG 1 (t Co ₂ /t Cu)	0.73	0.94	0.47	0.50	0.76	0.84	1.03
	GHG 2 (t Co ₂ /t Cu)	0.73	1.53	1.70	1.69	1.43	1.21	1.78
Collahuasi	Grade (%)	1.10	1.00	0.76	1.07	1.08	1.15	1.22
	Direct energy (GJ/t Cu)	9.04	12.27	21.69	13.47	13.08	13.95	11.97
	Indirect energy (GJ/t Cu)	9.20	10.11	16.91	10.47	10.36	10.09	9.07
	Water consumption (m3/t Cu)	70.24	77.72	130.59	68.29	72.40	68.47	62.66
	GHG 1 (t Co ₂ /t Cu)	0.74	1.13	1.90	1.12	1.09	1.29	1.15
	GHG 2 (t Co ₂ /t Cu)	2.05	2.02	3.31	2.35	2.35	2.22	1.95
El Soldado	Grade (%)	0.60	0.80	0.83	0.88	0.58	0.77	0.85
	Direct energy (GJ/t Cu)	37.37	35.66	28.36	26.72	39.63	35.59	21.73
	Indirect energy (GJ/t Cu)	25.58	21.34	18.42	18.32	28.95	21.58	18.28
	Water consumption (m3/t Cu)	118.9	139.4	115.5	89.03	137.6	111	90.72
	GHG 1 (t Co ₂ /t Cu)	2.97	2.90	2.15	2.00	3.26	2.64	1.61
	GHG 2 (t Co ₂ /t Cu)	1.81	2.09	1.95	2.17	5.42	2.07	1.76
Escondida	Grade (%)	1.25	0.97	1.37	1.33	1.32	1.00	0.94
	Direct energy (GJ/t Cu)	10.02	14.81	12.85	10.88	11.62	12.68	15.97
	Indirect energy (GJ/t Cu)	10.12	13.35	10.42	9.78	9.46	11.57	14.84

	Water consumption (m3/t Cu)	69.73	87.14	75.80	82.53	89.13	95.35	117.7
	GHG 1 (t Co ₂ /t Cu)	0.76	1.10	0.99	0.86	0.91	1.00	1.43
	GHG 2 (t Co ₂ /t Cu)	1.37	3.51	2.60	2.49	2.44	2.90	3.59
Sierra Gorda	Grade (%)						0.38	0.34
	Direct energy (GJ/t Cu)						55.37	44.40
	Indirect energy (GJ/t Cu)						44.83	38.20
	Water consumption (m3/t Cu)						532.1	551.8
	GHG 1 (t Co ₂ /t Cu)						4.34	3.47
	GHG 2 (t Co ₂ /t Cu)							
Ministro Hales	Grade (%)				1.25	1.58	1.57	1.21
	Direct energy (GJ/t Cu)				48.36	15.86	9.90	10.34
	Indirect energy (GJ/t Cu)				6.27	9.28	7.18	7.81
	Water consumption (m3/t Cu)				46.48	55.79	38.52	225
	GHG 1 (t Co ₂ /t Cu)				3.35	1.10	0.68	0.72
	GHG 2 (t Co ₂ /t Cu)				1.98	2.07	1.54	1.56
Andina	Grade (%)	0.81	0.82	0.83	0.78	0.77	0.81	0.78
	Direct energy (GJ/t Cu)	5.71	5.01	5.61	7.73	7.57	7.37	7.41
	Indirect energy (GJ/t Cu)	10.83	11.24	10.93	11.57	12.36	12.87	15.17
	Water consumption (m3/t Cu)	143.8	128.9	130.63	136.6	140	153	170.3
	GHG 1 (t Co ₂ /t Cu)	0.40	0.35	0.34	0.54	0.53	0.51	0.51
	GHG 2 (t Co ₂ /t Cu)	0.74	0.84	0.85	1.07	0.88	0.88	1.32
Candelaria	Grade (%)	0.63	0.75	0.60	0.94	0.65	0.60	0.52
	Direct energy (GJ/t Cu)					26.85	19.65	17.27
	Indirect energy (GJ/t Cu)					22.16	19.86	23.22
	Water consumption (m3/t Cu)					214.2	205.8	220.1
	GHG 1 (t Co ₂ /t Cu)					1.85	1.53	1.42
	GHG 2 (t Co ₂ /t Cu)					1.79	1.91	2.32

ANEXO C : ENERGETIC COMPOSITION PER YEAR

	2010		2011		2012		2013		2014		2015		2016	
	SIC	SING	SIC	SING	SIC	SING	SIC	SING	SIC	SING	SIC	SING	SIC	SING
Hydroelectric	49%	0.40%	45%	0.40%	41%	0.50%	38%	0.50%	45%	0.50%	45%	0.40%	36%	0.40%
Thermoelectric	50%	99.70%	55%	99.50%	58%	99.50%	61%	99.50%	52%	97.80%	50%	96.30%	57%	94.50%
^a														
Eolic + Solar	1%	0.00%	1%	0.00%	1%	0.00%	1%	0.00%	3%	1.70%	5%	3.20%	7%	5.1%
Total	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Source: CDEC-SING (2016), CDEC-SIC (2013a), CDEC-SIC (2013b), CDEC-SIC (2013c), CDEC-SIC (2014), CDEC-SIC (2015), CDEC-SIC (2016), CDEC-SIC (2017).

^a Includes cogeneration