

Reducción de Emisiones Globales de Carbono Refinar el Cobre en Chile

Autores:

Gino Sturla Zerene.
Eugenio Figueroa B.
Massimiliano Sturla Z.
José Flores P.

Santiago, Marzo de 2017

*REDUCCIÓN DE EMISIONES GLOBALES DE CARBONO
REFINAR EL COBRE EN CHILE*

*GINO STURLA ZERENE¹
EUGENIO FIGUEROA B.²
MASSIMILIANO STURLA Z.³
JOSÉ FLORES P.⁴*

Marzo 10, 2017

¹ Ingeniero Civil Hidráulico y estudiante de Doctorado en Economía, Universidad de Chile. gsturla@ing.uchile.cl gsturla@fen.uchile.cl

² Doctor en Economía, Profesor Titular y Director del Departamento de Economía, Facultad de Economía y Negocios, Universidad de Chile.

³ Estudiante Ingeniería Civil de Minas, Universidad Técnica Federico Santa María.

⁴ Ingeniero Civil Mecánico e Ingeniero Comercial. Profesor de la Universidad de Santiago de Chile.

"...estamos aumentando la cantidad de gases de efecto invernadero, especialmente dióxido de carbono (...) y con ello, alterando el delicado equilibrio que hace de este planeta uno habitable..."

Laura Gallardo Kleaner, Directora Centro del Clima y la Resiliencia, (CR2).
22 de julio de 2015, Conicyt, Chile.

Resumen

En este estudio se estima, por primera vez, el monto total de emisiones de carbono asociadas al transporte de material estéril contenido en el concentrado de cobre exportado desde Chile hacia el resto del mundo. Utilizando datos oficiales del año 2014, se estiman las emisiones de CO₂ evitables que ese año se emiten innecesariamente a la atmósfera global por refinar el cobre en Chile, en vez de exportarlo como concentrado de cobre. Se calcula la distancia de las rutas náuticas (origen-destino) utilizadas para todos los embarques de concentrados exportados realizados en año 2014. Además, las estimaciones muestran un análisis de sensibilidad para 4 escenarios, resultantes de considerar dos valores para cada uno de dos parámetros que presentan incertidumbre: i) consumo de combustible de los barcos que transportan el mineral; y, ii) la distancia efectiva que recorren estos barcos, ya que no viajan directo a los puertos de destino. Las emisiones evitables de CO₂ estimadas resultan ser de entre 1,5 y 2,0 millones de toneladas de CO₂ el año 2014, para los dos escenarios extremos considerados. La gran relevancia de estos resultados desde el punto de vista de política ambiental queda demostrada por el hecho que, si en vez de exportar concentrados de cobre al resto del mundo, Chile refinara domésticamente dichos concentrados, como resultado de las emisiones de gases de efecto invernadero evitadas con esto, el sector minero chileno cumpliría holgadamente con la meta comprometida por Chile para el año 2030, de reducir en 30% sus emisiones por unidad de PIB generado respecto del nivel alcanzado el año 2007 (Contribución Nacional Tentativa de Chile anunciada en New York en septiembre de 2015 para la COP 21 de París).

Palabras Claves: Emisiones Globales de Carbono, Minería del Cobre, Transporte Marítimo, Cambio Climático

Clasificación JEL: Q32, Q42, Q56,

Introducción

En los últimos 10 años Chile ha representado alrededor del 30% de la producción de cobre del Mundo (Cochilco, 2016). Una parte significativa del cobre exportado desde Chile no es refinado; ésta parte es exportada como concentrado de cobre, material que resulta del procesamiento inicial del mineral mediante chancado, flotación, espesamiento y filtrado, y que contiene cobre en alrededor de 30% más otros minerales y fundamentalmente material estéril. En este trabajo se entenderá por refinar el cobre al conjunto de procesos requeridos para obtener un producto con más de 99% de cobre⁵ (Codelco, 2015).

El año 2014, en Chile se exportó el equivalente a 5,7 millones de toneladas de cobre fino, de las cuales casi 2,8 millones correspondieron a cobre en forma de concentrado y 3,0 millones a refinado⁶. La Tabla 1 ilustra la forma en la cual se ha exportado cobre en la última década y en el año 2014 en particular. Al inicio de la década el porcentaje de cobre concentrado correspondió a 41% y llegando a 47% al año 2015.

Chile: Cobre exportado como concentrado de cobre y como cobre refinado; 2014 y promedio 2006-2015.

Tipo Cobre Exportado	Proporción 2014	Proporción 2006-2015
COBRE CONCENTRADO	48%	40%
COBRE REFINADO	52%	60%

Fuente: Elaboración propia a partir de información de Cochilco (2016)

Como se aprecia en la Tabla 1, alrededor del 40% del cobre se exporta en forma de concentrado de cobre. El concentrado de cobre contiene entre 20% y 40% de cobre (Banco Central, 2015), promediando 30% el año 2014. Los millones de toneladas de cobre que se exportan cada año en forma de concentrado de cobre llevan, adicionalmente, alrededor de 2,4 veces su peso en material estéril, peso que obviamente se evitaría de transportar si el cobre fuera exportado como cobre refinado en vez de en forma de concentrado de cobre. En los concentrados van otros minerales, que representan un porcentaje menor, y que no son preocupación de este estudio.

El año 2014, se efectuaron 919 embarques de concentrados de cobre en Chile, desde 13 puertos y hacia 22 países (Banco Central, 2015). La distancia náutica directa recorrida en total por estos embarques correspondió a más de 15,5 millones

⁵ Estos procesos corresponde fundamentalmente el transporte, la fundición y los procesos electroquímicos o térmicos para llegar al producto final. En este trabajo cada vez que se alude a refinar el cobre, se está contemplando esta cadena de procesos.

⁶ El refinado corresponde, para efectos de este trabajo, a cátodos que contienen 99,9% de cobre, obtenidos en base a procesos electroquímicos y al llamado blíster, cobre fundido y sometido a un proceso de refinación en horno, el contenido de cobre es de 99,4%.

de kilómetros, equivalente a 40,3 veces la distancia entre la Tierra y la Luna. El transporte de millones de toneladas de material estéril a estas enormes distancias implica, cada año, la quema de millones de barriles de combustible por los barcos que las transportan desde Chile al resto del mundo y, como consecuencia, la generación de millones de toneladas de gases de efecto invernadero (GEI) que son emitidas a la atmósfera, y que contribuyen al calentamiento global y el cambio climático (IPCC, 2014).

El principal objetivo de este trabajo es identificar las emisiones de carbono asociadas al transporte de material estéril incorporado en los concentrados de cobre exportados desde Chile. Esto es relevante, pues si el concentrado fuese refinado en Chile, el planeta se beneficiaría por la reducción de una importante cantidad de emisiones de carbono que se dejaría de emitir a la atmósfera.

Este trabajo no ahonda en las razones por las que no se refina el cobre en Chile; sin embargo, diversos autores han demostrado que no hay justificación para que esto ocurra, más allá de cualquier consideración ambiental (Correa, 2016 y Alcayaga, 2005). Incluso trabajos realizados con anterioridad al reciente boom del precio del cobre (2004-2016) son enfáticos en señalar que la refinación del cobre debe hacerse en Chile (Dulanto, 1999 y Meller, 2000). En definitiva, no hay consideraciones económicas que indiquen que sea ineficiente refinar en Chile los concentrados de cobre que el país actualmente exporta.

Es válido suponer que las emisiones de GEI, o más precisamente, que el equivalente en toneladas de dióxido de carbono (CO₂) de las emisiones totales de GEI generadas por la refinación en Chile de los concentrados de cobre que el país actualmente exporta serán las mismas que las producidas en los más de 20 países a los cuales se exporta el concentrado para ser refinado. No hay ningún efecto atmosférico adicional esperable si el cobre se refina en un solo país o si esta actividad se realiza de manera desconcentrada (IPCC, 2014). Respecto a posibles efectos locales, la extensa y variada geografía de Chile permite ubicar una o más plantas de refinado de cobre sin ningún efecto sobre la salud de la población y los servicios eco-sistémicos (CEPAL, 2009).

Como se explica más adelante, refinar el cobre en Chile representa una manera en que el sector minero chileno podría contribuir para que Chile logre cumplir sus compromisos internacionales de reducción de emisiones de GEI. Estos compromisos se refieren a reducción de las emisiones de CO₂ generadas por unidad de valor agregado (PIB) producido en la economía.⁷ Al año 2013, las emisiones por valor agregado en Chile correspondieron a 0,92 toneladas de CO₂ por millón de pesos

⁷ Para el Acuerdo Climático de la COP21 de París, Chile comprometió una Contribución Nacional Tentativa (INDC, por su sigla en inglés: Intended Nationally Determined Contribution) consistente en reducir en 30%, para el año 2030, el nivel de emisiones de CO₂ por unidad de PIB producido que exhibía el país el año 2007 (1,02 tCO₂e/1.000.000 CLP 2011 PIB) (Gobierno de Chile, 2015).

chilenos de PIB generado, monto que se ha mantenido bastante estable. Las emisiones asociadas a la refinación de cobre para el mismo periodo son menores a 0,8 toneladas de CO₂ por millón de pesos chilenos (López et al., 2016 y Cochilco, 2016). Lo anterior implica que refinar domésticamente los concentrados de cobre en vez de exportarlos al resto del mundo reduciría las emisiones totales por unidad de valor agregado producido en la economía nacional, lo cual representaría un cambio en la dirección deseada respecto de la contribución de Chile a los esfuerzos mundiales contra el calentamiento global y el cambio climático (OCDE, 2016).

Más aún, Chile posee condiciones muy favorables para la generación fotovoltaica de energía eléctrica en las zonas donde se ubica la minería (en las regiones I a IV en que se concentra la minería en Chile, los factores de radiación solar son de alrededor de 4,5 Kcal/m²/día, lo que corresponde, por ejemplo, a aproximadamente 18-20 veces los factores que exhibe la zona norte de Europa). Se suma a lo anterior la interconexión de los dos grandes sistemas eléctricos del país (Sistema Interconectado Central (SIC) y el Sistema Interconectado del Norte Grande (SING)) y la alta capacidad proyectada para incorporar energías renovables no convencionales en la matriz eléctrica (Ministerio de Energía, 2015). Esto podría implicar que refinar en Chile los concentrados de cobre que el país actualmente exporta, en vez de efectuarlo en el resto del mundo como se hace hoy día, eventualmente significaría un ahorro adicional de emisiones de carbono a la atmósfera global. Esto debido a la eliminación del transporte de millones de toneladas de material estéril, que resultaría de la disminución de emisiones de GEI a la atmósfera por la refinación doméstica de los concentrados de GEI y utilizando energías que generan menos emisiones de carbono que las tecnologías actualmente utilizadas en el resto del mundo. En este estudio no se incorpora el cálculo de esta eventual reducción adicional de emisiones a la atmósfera global.

Existe consenso mundial sobre la incidencia de las concentraciones en la atmósfera de los gases de efecto invernadero, en especial las de dióxido de carbono (CO₂), sobre los procesos físicos globales, y sus implicancias sobre el aumento de la temperatura y el cambio en otras variables climáticas (Levitus 2009; IPCC, 2014). Se ha demostrado, con 95% de confiabilidad (IPCC, 2014), que el aumento de emisiones de carbono generadas por el hombre en el mundo, ha provocado y provocará consecuencias perjudiciales para el planeta, entre las cuales destacan: aumento del nivel del mar, mayor frecuencia e intensidad de desastres naturales (mega-sequías, inundaciones, incendios forestales) y disminución de la disponibilidad de agua para consumo humano y actividades económicas relevantes (IPCC, 2014).

Numerosos estudios científicos han advertido que un aumento de la temperatura global de más de 1°C respecto del año 2000 constituirá un cambio climático "peligroso" a juzgar por los efectos esperados sobre el nivel del mar y la desaparición de especies (Hansen et al, 2006). A pesar de esto, ya el año 2009, la

OCDE proyectaba que si no se tomaba nuevas acciones de política, las emisiones globales de GEI aumentarían en 70% al 2050 y continuarían creciendo posteriormente, lo que llevaría a un incremento de la temperatura planetaria de 4°C por sobre el nivel preindustrial, y posiblemente de 6°C al año 2100 (OCDE, 2009). Esto tendría profundas implicaciones planetarias; causaría una significativa destrucción de los hábitats de plantas y animales y una reducción de los rendimientos de importantes cultivos alimentarios, y grandes contingentes de personas estarían expuestos a los desastres causados por las sequías y las inundaciones (Hansen et al., 2012, 2010; Schmidt et al., 2014; IPCC, 2007).

La reducción de las emisiones de GEI y la disminución sus concentraciones en la atmósfera planetaria es una tarea conjunta; existen variados acuerdos, y convicción de que una gran cantidad de medidas eficaces pueden atenuar los efectos del calentamiento global. Especial énfasis se da a las emisiones evitables, en las cuales Chile puede y debe asumir una responsabilidad concreta (OCDE, 2013). En este contexto, las estimaciones efectuadas en este trabajo constituyen un aporte relevante pues identifica y cuantifica una fuente significativa de emisiones de carbono a la atmósfera global que puede ser eliminada. Refinar el cobre en Chile es una contribución que el país puede y debe hacer a la salud del planeta; además, como se argumentará más adelante, esto podría permitirle a Chile cumplir con sus compromisos internacionales para combatir el calentamiento global.

En lo que sigue se detalla la metodología y la información utilizadas para estimar las emisiones de carbono generadas por el transporte de material estéril contenido en los concentrados de cobre exportados desde Chile hacia cada país comprador y al total del resto del mundo; posteriormente se presenta algunas estadísticas útiles.

En la sección 3 se reporta los resultados por país y para el total exportado para cuatro escenarios variando dos parámetros necesarios de estimar: i) el consumo de combustible de los barcos que transportan el mineral y ii) la distancia efectiva que recorren estos barcos, ya que no viajan directo a los puertos de destino. La sección final analiza la importancia de los resultados obtenidos y la necesidad de que Chile tome acciones concretas en materia de reducción de emisiones de GEI evitables para el planeta.

Metodología de cálculo

A continuación se detalla la metodología para el cálculo las emisiones de CO2 evitables (o innecesarias de generar), asociadas al transporte de material estéril incorporado en las exportaciones de concentrados de cobre desde Chile, por país y en total.

Transporte de material estéril por país de destino y total

Se define el material estéril por país de destino (E_l), como toda la cantidad de concentrado transportada hacia el país l y que no corresponde a contenido de cobre:

$$E_l = \sum_j \cdot \sum_k \cdot E_{j,k,l} \quad [1]$$

Donde,

$E_{j,k,l}$ = cantidad de material estéril con origen en el puerto chileno j y destino en el puerto k del país l

$$E_{j,k,l} = C_{j,k,l} \cdot (1 - L_{j,k,l}) \quad [2]$$

Donde,

$C_{j,k,l}$ = cantidad de concentrado del embarque con origen en el puerto chileno j y destino en el puerto k del país l

$L_{j,k,l}$ = porcentaje de cobre del concentrado asociada a un embarque con origen en el puerto chileno j y destino en el puerto k del país l

La ecuación (3) define H , que corresponde al material estéril total transportado **durante el año 2014 desde Chile hacia el resto del mundo.**

$$H = \sum_j \cdot \sum_l \cdot E_l \quad [3]$$

Emisiones de carbono evitables generadas por país de destino y total

Se define A_l como el total de emisiones asociadas al transporte de material estéril que viaja al país l, siendo necesario atravesar el canal de Panamá; esto último trae como consecuencia que los buques sean de menor tamaño y, por ende, su consumo de combustible será menor por distancia recorrida.

$$A_l = \frac{f \cdot a}{g \cdot h} \sum_j \sum_k (d_{j,k,l} \cdot E_{j,k,l}) \quad [4]$$

Donde,

f = factor de emisiones de carbono asociada al combustible (diésel) g = factor de corrección por no utilización de capacidad completa de los buques
 a = consumo de combustible de buques que pasan por canal de Panamá
 b = consumo de combustible de buques que no pasan por canal de Panamá
 h = factor de viajes, recoge el hecho de que los buques no viajan directo
 $d_{j,k,l}$ = distancia náutica directa entre el puerto chileno j y puerto k perteneciente al país l

Se define B_l como el total de emisiones asociadas al transporte de material estéril que viaja al país l , para llegar al cual no es necesario atravesar el canal de Panamá:

$$B_l = \frac{f \cdot b}{g \cdot h} \sum_j \sum_k (d_{j,k,l} \cdot E_{j,k,l}) \quad [5]$$

Donde,

b = consumo de combustible de buques que no pasan por canal de Panamá

Se define Z , como las emisiones totales de carbono producidas por el transporte de material estéril contenido en las exportaciones de concentrado de cobre desde Chile al resto del mundo, en el año 2014:

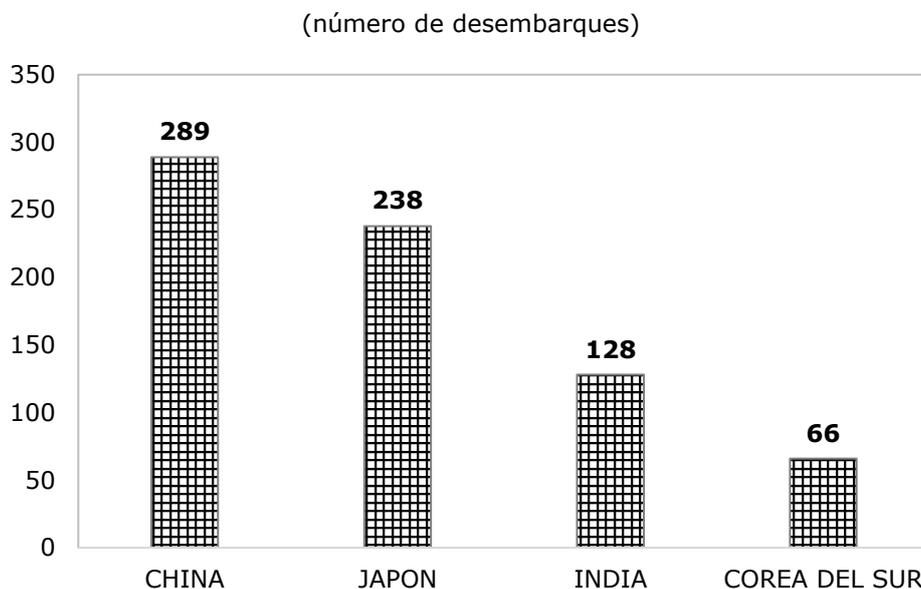
$$Z = \sum_l (A_l + B_l) \quad [6]$$

Embarques de concentrado de cobre año 2014

La información de interés corresponde a los embarques de concentrado de cobre exportados desde Chile el año 2014. La base de datos correspondiente del Banco Central (2015) contiene 919 embarques a los que se asocia 6 características de interés para este estudio: la compañía o sociedad exportadora del material; la cantidad bruta total de concentrado de cobre (incluye humedad); el porcentaje de cobre del concentrado (masa de cobre sobre masa de cantidad bruta de concentrado); el puerto de origen (todos chilenos); el puerto de destino (todos extranjeros); y el país al que pertenece el puerto de destino final del embarque.

La Figura 1 presenta los 4 países con mayor número de desembarques de concentrados importados desde Chile: China, Japón, India y Corea del Sur. Estos países reciben el 78% de los embarques de concentrado de cobre que salen desde Chile.

Figura 1
Chile: Número de desembarques de concentrados de cobre en los principales 4 países de destino; 2014

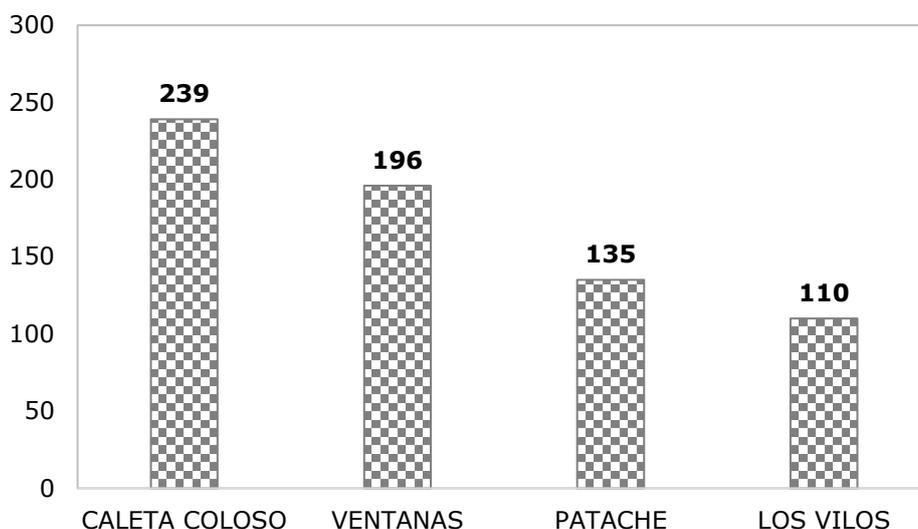


Fuente: Elaboración propia con información de Banco Central (2015)

La Figura 2 muestra el origen de los embarques de concentrado de cobre desde los 4 principales puertos chilenos de los que sale la mayor cantidad de los 919 embarques registrados el año 2014. El puerto de Caleta Coloso muestra la mayor cantidad de embarques con un total de 239.

Figura 2

Chile: Cantidad de embarques de concentrado de cobre por puerto de salida; 2014
(número de embarques)

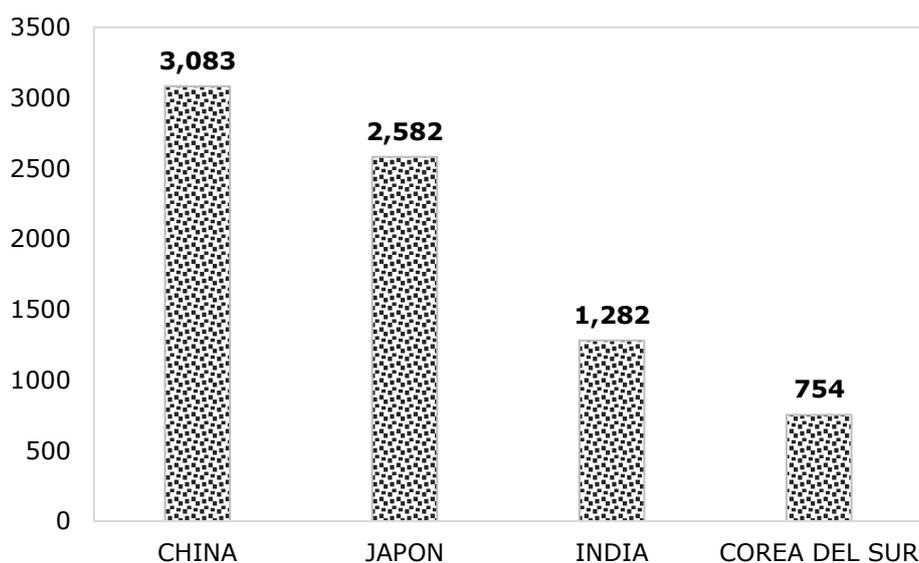


Fuente: Elaboración propia con información de Banco Central (2015)

La Figura 3 presenta los 4 países que reciben las mayores cantidades de concentrado de cobre exportado desde Chile. En conjunto, estos cuatro países – China, Japón, India y Corea del Sur – representan un 82% del total del concentrado exportado desde Chile el año 2014.

Figura 3

Chile: Cantidad concentrado de cobre exportado desde Chile por país de destino; 2014
(miles de toneladas)



Fuente: Elaboración propia con información de Banco Central (2015)

Porcentaje de cobre por exportador

El porcentaje de cobre promedio para cada empresa, se obtiene en base a la cantidad total de material exportado en cada embarque y la ley de cobre reportada por aduana. A partir de la base de datos utilizada, se estimó que el porcentaje de cobre promedio de todo el concentrado que se exportó el año 2014 desde Chile fue de 30%. Como se puede apreciar en la Tabla 2, los embarques exportados ese año presentaron en su mayoría un porcentaje de cobre de entre 25% y 30%.

Tabla 2

Chile: Número de empresas exportadoras de concentrados de cobre nacionales según porcentaje de cobre en sus concentrados; 2014
(nº de empresas exportadoras)

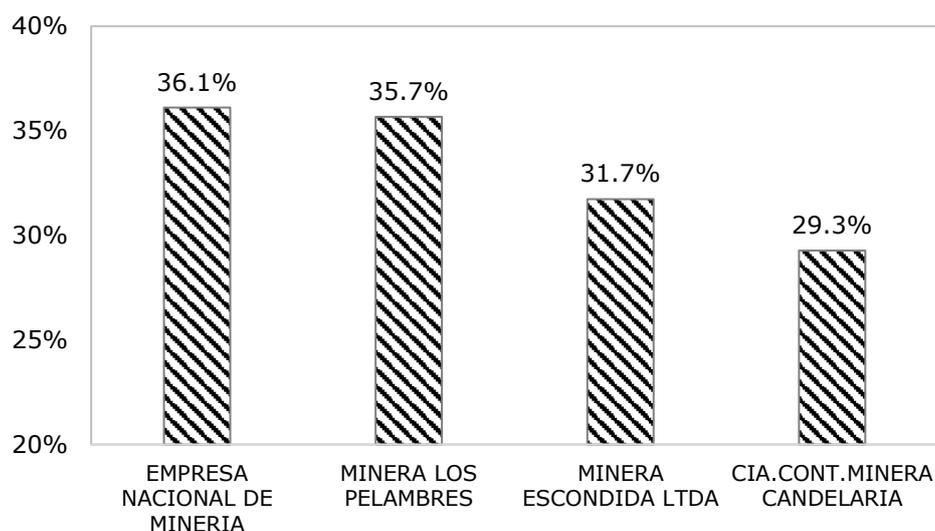
Porcentaje de Cobre	Número de empresas exportadoras
20-25%	2
25-30%	13
30-35%	1
35-40%	2

Fuente: Elaboración propia con información de Banco Central (2015)

En la Figura 4 se presenta los cuatro exportadores que muestran mayores porcentajes de cobre en sus concentrados exportados. La Empresa Nacional de Minería (ENAMI) presenta el contenido más alto de cobre con 36,1%, seguida muy de cerca por Minera los Pelambres con 35,7%, y un poco más abajo aparecen Minera Escondida con un 31,7% y Minera Candelaria con un 29,3%.

Figura 4

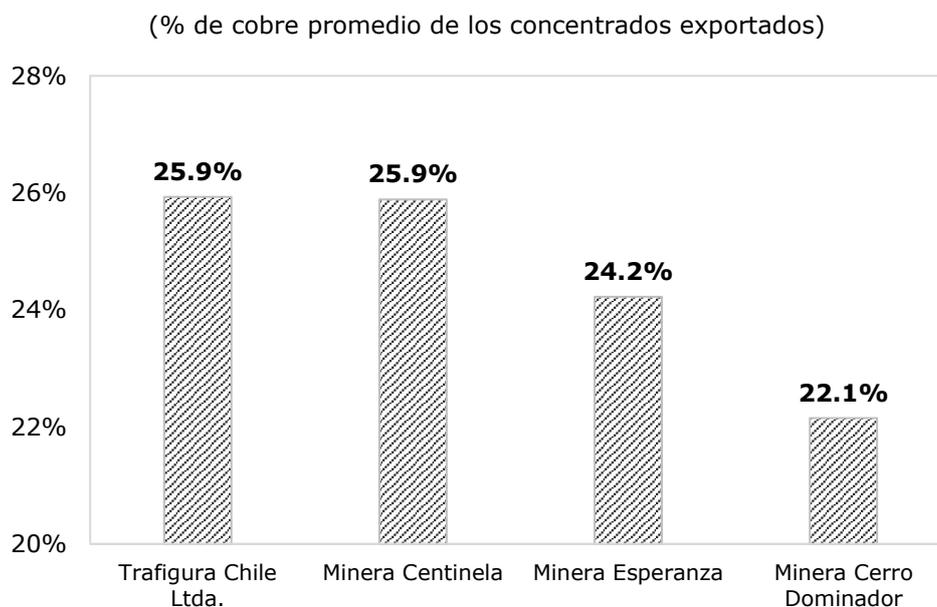
Chile: Exportadores de concentrados de cobre con más altos contenidos de cobre promedio: 2014
(% de cobre promedio en los concentrados exportados)



Fuente: Elaboración propia con información de Banco Central (2015)

En la Figura 5 se aprecian las cuatro compañías que exhibieron, el año 2014, los más bajos porcentajes de cobre en sus concentrados exportados; Minera Cerro Dominador es la que presenta el menor contenido: 22,1%.

Figura 5
Chile: Exportadores de concentrados con contenidos más bajos de cobre promedio; 2014



Fuente: Elaboración propia con información de Banco Central (2015)

Matriz origen-destino de las exportaciones de concentrados de cobre

Existe un total de 97 rutas origen-destino asociadas al transporte de los 919 embarques de exportación de concentrados de cobre realizados desde Chile el año 2014. Para cada una de estas rutas se calculó la distancia náutica directa involucrada utilizando la herramienta computacional "Distances and Times" (Sea Rates, 2017), que permitió determinar también cuáles de estas rutas pasaron por el canal de Panamá.

En el Apéndice D, se muestra el detalle de las 97 rutas, la distancia en kilómetros, el material estéril que se transportó por esa ruta y si ésta pasa o no por el canal de Panamá. Es importante recalcar que estas rutas consideran viajes directos, lo cual en la práctica no es así, pues los buques hacen varias escalas. En la sección 3.5 se describe como se aborda este aspecto con el objeto de no subestimar las emisiones generadas por el transporte del material inerte contenido en los concentrados de cobre exportados desde Chile.

La Tabla 3 presenta, tanto las rutas que pasan por el canal de Panamá como para las que no lo hacen, la distancia promedio, la cantidad total de material estéril transportado por cada ruta y el porcentaje de material estéril respecto al total.

Tabla 3

Chile: Distancia recorrida y cantidad de material estéril transportado por cada tipo de ruta de transporte de los concentrados de cobre exportados; 2014

Ítem	Ruta por canal de Panamá	Ruta NO canal de Panamá
Distancia náutica promedio	14.300 km	15.900 km
Material estéril	780.000 ton	5.800.000 ton
Porcentaje materia estéril	12%	88%

Fuente: Elaboración propia con datos de Banco central (2015) y Sea Rates (2017)

Barcos para transporte

Al año 2014, las rutas asociadas al canal de Panamá no permiten el transporte en barcos con capacidad bruta mayor a 52.000 toneladas; por esto, los buques que se ha considerado en el cálculo para el transporte de concentrados de cobre a través de esta ruta corresponden a los llamados "Panamax". Las demás rutas no implican restricciones de capacidad; y, con el objeto de no sobrestimar las emisiones evitables, se ha considerado como representativo un barco grande y eficiente, con capacidad bruta de 193.000 toneladas, del tipo del "MSC Oscar" de la Mediterranean Shipping Company.

La Tabla 4 presenta las características relevantes de ambos tipos de barcos utilizados para las estimaciones de este estudio. La información para los "Panamax" ha sido obtenida de Alphaliner (2011) y Access (2014). Respecto a los barcos del tipo "MSC Oscar", se ha utilizado las referencias ABB (2015) y MSC (2017).

Tabla 4

Características principales de los buques utilizados para el transporte de concentrados de cobre desde Chile al resto del mundo.

Ítem	Msc Oscar	Panamax
Tonelaje Bruto	193.000 toneladas	52.000 toneladas
Tipo Combustible	Diésel	Diésel
Consumo Combustible	>280 litros por km	>95 litros por km

Fuente: Elaboración propia con información de Alphaliner (2011), Access (2014), ABB (2015) y MSC (2017)

El consumo de combustible se puede ver afectado por las condiciones adversas, sobre todo en viajes de gran trayecto como los considerados en este estudio. Por esta razón, para efectos de los cálculos se ha utilizado un escenario en que el

consumo es un 20% mayor para ambos tipos de barcos (Access, 2014). Así para los barcos tipo "Panamax" el consumo medio considerado es de 114 litros por km recorrido y para los barcos tipo "MSC Oscar" es de 336 litros por km recorrido.

Factores de corrección: utilización de carga y distancia recorrida

El tonelaje bruto de los barcos presentado en la sección anterior no corresponde a la capacidad efectiva de los buques. Por ello, se utiliza un factor de corrección que representa la proporción de la capacidad de los barcos que efectivamente se puede considerar como carga, y que corresponde a 55% (Enertrans, 2008 y Trozzi-Rita, 1999).

Respecto a la distancia recorrida por los buques, se ha considerado las distancias náuticas directas, sin embargo, estos buques efectúan viajes con varias paradas intermedias, lo cual hace que la distancia efectiva recorrida sea bastante mayor, sobre todo en el caso de los buques que pasan por el canal de Panamá. Se ha considerado un factor que representa el cociente entre la distancia náutica directa y la distancia efectiva. Para los buques que pasan por el canal de Panamá se asume dos escenarios para este coeficiente: 60% y 70%. Para los buques de mayor tamaño, ha considerado también dos escenarios, 70% y 80% (Enertrans, 2008; Trozzi, 1999 y Access, 2014).

Factor de emisión de CO2

La quema de combustibles genera emisiones de los distintos gases de efecto invernadero con distintas capacidades para generar calentamiento global, las que pueden expresarse para cada gas en relación a la capacidad propia del CO2. Por ello, para los distintos tipos de combustibles se calcula la cantidad de toneladas de CO2 equivalente que produce la quema de un volumen determinado del combustible. En el caso de este estudio, dado que los buques que transportan los concentrados de cobre exportados desde Chile al resto del mundo utilizan diésel como combustibles, el factor utilizado corresponde a 2,8 toneladas de CO2 por cada metro cúbico de combustible utilizado, de acuerdo al Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC, 2014).

Resultados

Escenarios

Como se mencionó en la sección anterior, en los cálculos realizados hay dos parámetros involucrados para los cuales se considera 2 valores a objeto de presentar un análisis de sensibilidad; esto, debido a la incertidumbre sobre el valor de tales parámetros. Dichos parámetros corresponden al factor de corrección de la distancia de transporte de los concentrados y al factor de uso de combustible por los barcos (tanto para los barcos que pasan por el canal de Panamá como los que no lo hacen). La Tabla 5 presenta los 4 escenarios resultantes de y los dos valores utilizados para cada uno de los dos parámetros antes mencionados.

Tabla 5
Caracterización de los 4 escenarios considerados para la estimación de las emisiones de CO2 evitadas, para los dos tipos de barcos empleados en el transporte de concentrados de cobre desde Chile

Escenario	Factor distancia transporte (%)		Factor uso combustible (litros por km)	
	Barco Panamax	Barco MSC Oscar	Barco Panamax	Barco MSC Oscar
A	60%	70%	95	280
B	70%	80%	95	280
C	60%	70%	114	336
D	70%	80%	114	336

Fuente: Elaboración propia

Emisiones adicionales de CO2

Para cada uno de los 4 escenarios considerados se calcula las emisiones de CO2 producto del transporte de material estéril contenido en los concentrados de cobre exportados desde Chile el año 2014, para cada país de destino y para el monto total. La Tabla 6 presenta un resumen de los cuatro escenarios, indicando las emisiones adicionales totales, el combustible diésel total adicional y el valor del combustible adicional en dólares de los Estados Unidos de Norte América del año 2016. La Tabla 7 muestra la estimación de las emisiones evitables asociadas a cada escenario por país de destino y total. El rango para las emisiones evitables de CO2 va desde 1,5 a 2,1 millones de toneladas al año.

Tabla 6
Emisiones de carbono y combustible adicional para los 4 escenarios definidos

Escenario	Emisiones adicionales totales de CO2 (millones de toneladas)	Combustible-Diésel adicional (millones de toneladas)	Valor Diésel (USD Millones)
A	1,68	601	462
B	1,48	516	397
C	1,73	619	476
D	2,02	721	554

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7
Emisiones adicionales de carbono por país de destino para cada escenario
(millones de toneladas de CO2)

PAIS DE DESTINO	ESCENARIO			
	A	B	C	D
	Emisiones CO2 evitadas (toneladas CO2 equivalente)			
ALEMANIA	23.747	20.779	24.935	28.497
BRASIL	37.334	32.001	38.401	44.801
BULGARIA	30.132	26.365	31.638	36.158
CANADA	68	60	72	82
CHINA	609.663	522.569	627.082	731.596
COREA DEL SUR	148.157	126.991	152.390	177.788
ESPAÑA	41.028	35.900	43.080	49.234
FILIPINAS	4.110	3.522	4.227	4.931
FINLANDIA	10.650	9.319	11.182	12.780
GEORGIA	126	110	132	151
HOLANDA	522	457	548	627
HONG KONG	873	748	898	1.048
INDIA	261.665	224.284	269.141	313.998
JAPON	491.224	421.049	505.259	589.469
MALASIA	257	221	265	309
MEXICO	626	536	643	751
NAMIBIA	5.239	4.490	5.389	6.287
PERU	196	168	202	236
SUECIA	7.205	6.304	7.565	8.646
TAIWAN	9.209	7.894	9.472	11.051
THAILANDIA	678	581	697	814
VIETNAM	235	202	242	282
Total	1.682.946	1.475.551	1.733.462	2.019.535

Fuente: Elaboración propia

Reflexiones Finales

El rango de las emisiones de gases de efecto invernadero innecesariamente generadas, y por lo tanto evitables, producto del transporte de material estéril va de 1,5 a 2,1 millones de toneladas de CO₂ equivalentes; montos que equivalen a entre 28% y 38% del total de las emisiones de CO₂ generadas por todo el sector de minería de Chile en el año 2014 (que alcanzan a alrededor de 5,5 millones de toneladas cuando se incluye las emisiones asociadas al consumo de electricidad por parte del sector (López et al., 2016)).

Chile ha comprometido reducir en 30% sus emisiones de CO₂ generadas por unidad de valor agregado (PIB) hacia el año 2030, tomando como base el 2007; esto implica pasar de 1,02 a 0,71 toneladas de CO₂ por millón de pesos chilenos de PIB en 23 años (Gobierno de Chile, 2015). Estas estimaciones implican que si se en vez de seguir exportando concentrados de cobre, Chile refinara todo el cobre en domésticamente, el país reduciría las emisiones globales de carbono en un monto equivalente a más del 30% de las emisiones de carbono por valor agregado del sector minero chileno. Esto, considerando un escenario conservador para la estimación de las emisiones adicionales (1,6 millones de toneladas de CO₂ equivalentes).

El consenso más importante en materia de reducción de gases de efecto invernadero, corresponde a la necesidad de acción conjunta de todos los países y a la definición de algunas iniciativas en esa dirección. No obstante, se destaca la crucial importancia de la acción de países líderes en la producción de ciertos bienes, sobre todo cuando ésta puede efectuarse con menores cantidades de emisiones de carbono, sin costo económico alguno (OCDE, 2016 y Garreaud 2011). Se debe recalcar que el cambio climático es un fenómeno que se puede enfrentar acciones concretas y efectivas; en el caso del cobre en Chile retrasar la decisión de refinar todo el cobre genera un perjuicio global.

Tal como se deduce de la cita que inicia este documento, aquí hemos mostrado que es irracional generar emisiones evitables (innecesarias) cada año, pues ello contribuye al lamentable hecho de que *"...estamos aumentando la cantidad de gases de efecto invernadero, especialmente dióxido de carbono..."*. Chile debe contribuir a enfrentar decididamente el calentamiento global utilizando herramientas e instrumentos como el analizado en este trabajo: refinar domésticamente el cobre que el país exporta hoy como concentrados de cobre y eliminar las emisiones de GEI que el transporte de dichos concentrados genera actualmente. No hacerlo, es constituirse en cómplice de lo que ningún ser racional puede desear para sus hijos y nietos: alterar *"...el delicado equilibrio que hace de este planeta uno habitable"*.

Referencias

1. ABB (2015). "Maritime cargo vessels - Is bigger better?" <https://new.abb.com>
2. Access (2014) "Calculation of fuel consumption per mile for various ship types and ice conditions in past, present and in future". *Arctic Climate Change, Economy and Society*. Project nº 265.863, D 2.42. Paris. France.
3. Alcayaga, J. (2005). "Manual del Defensor del Cobre". *Ediciones Tierra Mía Ltda.* Santiago. Chile.
4. Alphaliner (2011) "Ship Glossary" <https://www.alphaliner.com>
5. Banco Central (2015). "Embarque de concentrado de cobre, año 2014". *Estadísticas Banco Central de Chile*. Santiago. Chile.
6. CEPAL, (2009) "La Economía del Cambio Climático en Chile". *Publicación de la Organización de Naciones Unidas*. Santiago. Chile.
7. COCHILCO (2016). "Anuario Estadístico de la Minería". *Comisión chilena del cobre*. Santiago. Chile.
8. Correa, F. (2016). "¿Perdimos la oportunidad con el cobre?" Documento de trabajo DT 001. *Estudios Nueva Economía*. Santiago. Chile.
9. Dulanto, A. (1999). "Fundir y refinar más cobre en Chile". *Mimeo*. Santiago. Chile.
10. Enertrans (2008) "Energy consumption and emissions associated transportation by ship". *Fundación Universidad de Oviedo*. España.
11. Garreaud, R. (2011) "Cambio Climático: Bases físicas e impactos en Chile. *Revista Tierra Adentro* (INIA-Chile), No. 93. 13-19. Santiago. Chile.
12. Gobierno de Chile. (2015). Contribución Nacional Tentativa (INDC) para Acuerdo Climático París 2015. RUL: http://portal.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2015/09/INDC_1609c1.pdf
13. Hansen, J., Ruedy, R., Sato, M., and Lo, K. (2010). "Global Surface Temperature Change". *Rev. Geophys.* 48, RG4004, doi: 10.1029/2010RG000345.
14. Hansen, J., Ruedy, R., Sato, M., and Lo, K. (2010). "Global Surface Temperature Change". *Rev. Geophys.* 48, RG4004, doi: 10.1029/2010RG000345.
15. Hansen, J., Sato, M. and Ruedy, R. (2012). "Perception of climate change". *Proc. Natl. Acad. Sci.*, Published online August 6, 2012: E2.415-E2.423. www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1005276109.
16. Hansen, J., Sato, M., Ruedy, R., Lo, K., Lea, D. W. and Medina-Elizade, M. (2006). "Global temperature change". *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 103(39): 14.288-14.293. doi: 10.1073/pnas.0606291103.
17. IPCC. (2007). M.L. Parry, O. F. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. Van Der Linden and C. E. Hanson (eds.), *Climate Change 2007, Impacts, Adaptation and Vulnerability*. (Cambridge Press, New York, NY).
18. IPCC (2014) "Impacts, Adaptation and Vulnerability: Regional Aspects. Climate Change 2014". *IPCC Report*. Geneva. Switzerland.
19. López et al. (2016). "Análisis sectorial de la huella de carbono en la economía chilena: un enfoque basado en la matriz insumo-producto". *Serie Documentos de Trabajo, SDT 431*. Departamento de Economía, Facultad de Economía y Negocios, Universidad de Chile. pp. 61. Santiago. Chile.
20. Levitus, S. et al. (2009) "Global ocean heat content 1955–2008 in light of recently revealed instrumentation problems". *Geophysical Research Letters*. 36, L07608.

25. Meller, P. (2000). "El cobre chileno y la política minera". *Documentos de Trabajo*. Depto. de Ingeniería Industrial. Universidad de Chile. Santiago. Chile.
26. Ministerio de Energía (2015) "Una mirada participativa del rol y los impactos de las energías renovables en la matriz eléctrica futura". *Gobierno de Chile*. Santiago. Chile
27. MSC (2017). "Introducing de MSC Oscar". Web <https://www.msc.com>
28. OCDE (2013) "Climate and carbon: Aligning prices and policies" OECD *Environment Policy paper*, October 2013 n°01. Washington DC. USA.
29. OCDE (2016) "Evaluaciones del Desempeño Ambiental: Chile 2016". Washington DC. USA.
30. OCDE (2009) "Cost-Effective Actions to Tackle Climate Change". Policy Brief. August 2009. RUL: https://www.oecd.org/env/Policy_Brief_Cost-effective_actions_to_tackle_climate_change.pdf
31. Sea Rates (2017). "Distances and Time". Web <https://www.searates.com>
32. Schmidt, G. A., Shindell, D. T. and Tsigaridis, K. (2014). "Reconciling warming trends". *Nature Geoscience*, 7: 158-160.doi: 10.1038/ngeo2105.
33. Trozzi, C. (1999). "Calculating transport emissions and energy consumption". *Methodology for calculating transport emissions and energy consumption*. Part C. Ship transport. Belgium.

Apéndices

Apéndice A Cantidad de cobre y estéril por puerto de embarque

Puerto Origen	Material estéril (Miles de Ton)	Cobre (Miles de Ton)
ANTOFAGASTA	125,4	54,7
ARICA	3,6	1,4
CALDERA	373,4	154,6
CALETA COLOSO	1726,6	802,8
CHANARAL/BARQUITO	28,3	12,2
COQUIMBO	323,6	118,4
LOS VILOS	795,9	441,2
MICHILLA	600,3	192,7
PATACHE	1088,2	432,8
PUERTO ANGAMOS	29,7	15,5
SAN ANTONIO	3,6	1,4
VALPARAISO	3,8	1,3
VENTANAS	1474,1	579,9
Total general	6576,6	2808,9

Apéndice B Concentrado y porcentaje de cobre por exportador

Exportador	Concentrado (Miles de Ton)	Porcentaje de cobre
ANGLO AMERICAN NORTE S.A.	545,4	28,3%
ANGLO AMERICAN SUR S.A	1164,5	28,1%
CIA.CONT.MINERA CANDELARIA	528,0	29,3%
CIA.MIN.DONA INES COLLAHUASI S	975,7	28,5%
CIA.MINERA TECK CARMEN DE ANDA	276,0	27,0%
CODELCO CHILE	1102,3	28,9%
EMPRESA NACIONAL DE MINERIA	15,7	36,1%
GLENCORE CHILE S.A.	57,8	27,6%
MINERA CENTINELA	43,5	25,9%
MINERA CERRO DOMINADOR S.A.	1,5	22,2%
MINERA ESCONDIDA LTDA	2529,4	31,7%
MINERA ESPERANZA	749,5	24,2%
MINERA LAS CENIZAS S.A.	10,1	26,1%
MINERA LOS PELAMBRES	1237,1	35,7%
SCM MINERA LUMINA COPPER CHILE	57,7	26,0%
SIERRA GORDA SCM	14,8	28,6%
SOC. CONTRACTUAL MINERA ATACAM	5,9	27,7%
TRAFIGURA CHILE LTDA	70,9	25,9%
Total general	9385,4	30,0%

Apéndice C Material estéril y cobre por país de destino

País Destino	Material estéril (Miles de Ton)	Cobre (Miles de Ton)
ALEMANIA	163,1	62,4
BRASIL	324,5	137,3
BULGARIA	168,5	71,3
CANADA	0,7	0,2
CHINA	2166,1	917,2
COREA DEL SUR	528,6	225,6
ESPAÑA	319,3	130,3
FILIPINAS	14,5	7,5
FINLANDIA	66,7	25,2
GEORGIA	0,7	0,4
HOLANDA	3,8	1,7
HONG KONG	2,9	1,5
INDIA	892,1	389,7
JAPON	1798,2	783,3
MALASIA	0,8	0,4
MEXICO	7,8	3,8
NAMIBIA	29,6	14,2
PERU	8,5	3,5
SUECIA	45,9	17,8
TAIWAN	31,5	14,0
THAILANDIA	2,1	1,1
VIETNAM	0,7	0,4
Total general	6576,6	2808,9

Apéndice D Combinaciones origen-destino: distancia, material estéril y paso por Panamá

Origen	Destino	Material estéril (Miles de Ton)	Distancia Náutica (Km)	Paso Panamá (1=SI, 0=NO)
ANTOFAGASTA	CALLAO	0,6	1639	0
ANTOFAGASTA	HUELVA	7,6	12150	1
ANTOFAGASTA	KAOSIUNG	4,3	19008	0
ANTOFAGASTA	KEELUNG	5,9	18887	0
ANTOFAGASTA	MANZANILLO	3,1	6221	0
ANTOFAGASTA	OTROS PTO.INDIA NO E	30,2	19174	0
ANTOFAGASTA	OTROS PTOS. PANAMA	1,2	4108	0
ANTOFAGASTA	OTROS PTOS.DE CHINA	20,1	18681	0
ANTOFAGASTA	OTROS PTOS.DE	22,2	11407	0

Origen	Destino	Material estéril (Miles de Ton)	Distancia Náutica (Km)	Paso Panamá (1=SI, 0=NO)
	NAMIBIA			
ANTOFAGASTA	OTROS PTOS.HOLANDA	3,8	13072	1
ANTOFAGASTA	OTROS PTOS.JAPONESES	3,7	16932	0
ANTOFAGASTA	OTROS PTOS.SUECIA	9,4	14502	1
ANTOFAGASTA	PORI	9,4	14689	1
ANTOFAGASTA	VARNA	3,8	15852	1
ARICA	OTROS PTOS.DE CHINA	3,6	18318	0
CALDERA	HUELVA	117,6	12342	1
CALDERA	OTROS PTO.INDIA NO E	40,7	18828	0
CALDERA	OTROS PTOS.BRASIL	7,3	7680	0
CALDERA	OTROS PTOS.DE CHINA	66,1	14926	0
CALDERA	OTROS PTOS.DE COREA	15,4	18224	0
CALDERA	OTROS PTOS.JAPONESES	113,9	17121	0
CALDERA	OTROS PTOS.SUECIA	12,4	14694	1
CALETA COLOSO	OTROS PTO.INDIA NO E	376,9	19161	0
CALETA COLOSO	OTROS PTOS.BRASIL	106,4	8014	0
CALETA COLOSO	OTROS PTOS.DE CHINA	643,4	18676	0
CALETA COLOSO	OTROS PTOS.DE COREA	208,6	18027	0
CALETA COLOSO	OTROS PTOS.JAPONESES	383,6	16927	0
CALETA COLOSO	OTROS PTOS.TAIWAN	7,8	18882	0
CHANARAL/BAR QUITO	KAOHSIUNG	1,5	18899	0
CHANARAL/BAR QUITO	OTROS PTO.INDIA NO E	11,9	18883	0
CHANARAL/BAR QUITO	OTROS PTOS.DE CHINA	7,7	18775	0
CHANARAL/BAR QUITO	OTROS PTOS.JAPONESES	4,2	17043	0
CHANARAL/BAR QUITO	VARNA	3,0	15978	1
COQUIMBO	ILO	4,2	1450	0
COQUIMBO	OTROS PTO.INDIA NO E	34,4	18483	0
COQUIMBO	OTROS PTOS BULGARIA	35,8	16312	1
COQUIMBO	OTROS PTOS. PANAMA	3,5	4607	0
COQUIMBO	OTROS PTOS.ALEMANIA	83,6	14037	1
COQUIMBO	OTROS PTOS.BRASIL	16,4	7336	0
COQUIMBO	OTROS PTOS.DE CHINA	29,1	18794	0
COQUIMBO	OTROS PTOS.DE	8,5	18230	0

Origen	Destino	Material estéril (Miles de Ton)	Distancia Náutica (Km)	Paso Panamá (1=SI, 0=NO)
	COREA			
COQUIMBO	OTROS PTOS.JAPONESES	42,7	17171	0
COQUIMBO	OTROS PTOS.SUECIA	16,0	15001	1
COQUIMBO	PORI	49,4	15188	1
LOS VILOS	HUELVA	27,8	12649	1
LOS VILOS	OTROS PTO.INDIA NO E	40,9	18483	0
LOS VILOS	OTROS PTOS BULGARIA	41,4	16312	1
LOS VILOS	OTROS PTOS.ALEMANIA	14,3	14037	1
LOS VILOS	OTROS PTOS.BRASIL	21,2	7336	0
LOS VILOS	OTROS PTOS.DE CHINA	139,7	18794	0
LOS VILOS	OTROS PTOS.DE COREA	55,5	18230	0
LOS VILOS	OTROS PTOS.FILIPINAS	14,5	18236	0
LOS VILOS	OTROS PTOS.JAPONESES	440,4	17171	0
MICHILLA	HUELVA	33,7	12150	1
MICHILLA	OTROS PTOS BULGARIA	8,3	15813	1
MICHILLA	OTROS PTOS.ALEMANIA	25,3	13538	1
MICHILLA	OTROS PTOS.BRASIL	8,3	8027	0
MICHILLA	OTROS PTOS.DE CHINA	158,0	18681	0
MICHILLA	OTROS PTOS.DE COREA	67,2	18032	0
MICHILLA	OTROS PTOS.JAPONESES	299,5	16932	0
PATACHE	HUELVA	33,3	11781	1
PATACHE	OTROS PTO.INDIA NO E	158,2	19490	0
PATACHE	OTROS PTOS BULGARIA	19,9	15445	1
PATACHE	OTROS PTOS.ALEMANIA	31,8	13169	1
PATACHE	OTROS PTOS.DE CHINA	495,8	18491	0
PATACHE	OTROS PTOS.DE COREA	55,8	17664	0
PATACHE	OTROS PTOS.JAPONESES	293,6	17664	0
PUERTO ANGAMOS	BUSAN CY (PUSAN)	0,5	17910	0
PUERTO ANGAMOS	CALLAO	3,7	1517	0
PUERTO ANGAMOS	HONG KONG	2,9	19593	0
PUERTO ANGAMOS	HONG KONG TAIWAN	1,8	19593	0
PUERTO ANGAMOS	HONG KONG THAILANDIA	0,7	19593	0

Origen	Destino	Material estéril (Miles de Ton)	Distancia Náutica (Km)	Paso Panamá (1=SI, 0=NO)
PUERTO ANGAMOS	KEELUNG	1,2	18857	0
PUERTO ANGAMOS	MONTREAL	0,7	9890	1
PUERTO ANGAMOS	OTROS PTOS.DE CHINA	7,2	18652	0
PUERTO ANGAMOS	OTROS PTOS.DE NAMIBIA	7,3	11517	0
PUERTO ANGAMOS	OTROS PTOS.GEORGIA	0,7	16532	1
PUERTO ANGAMOS	OTROS PTOS.MALASIA	0,8	19676	0
PUERTO ANGAMOS	OTROS PTOS.THAILANDIA	1,4	20763	0
PUERTO ANGAMOS	OTROS PTOS.VIETNAM	0,7	20316	0
SAN ANTONIO	KEELUNG	1,1	18560	0
SAN ANTONIO	OTROS PTOS.DE CHINA	2,5	18778	0
VALPARAISO	OTROS PTOS.DE CHINA	3,8	18773	0
VENTANAS	DAIREN	46,9	19129	0
VENTANAS	HUELVA	92,4	12913	1
VENTANAS	OTROS PTO.FINLANDIA	7,8	15401	1
VENTANAS	OTROS PTO.INDIA NO E	198,9	18167	0
VENTANAS	OTROS PTOS BULGARIA	63,4	16576	1
VENTANAS	OTROS PTOS.ALEMANIA	8,0	14300	1
VENTANAS	OTROS PTOS.BRASIL	164,9	7019	0
VENTANAS	OTROS PTOS.DE CHINA	462,6	18799	0
VENTANAS	OTROS PTOS.DE COREA	117,6	18302	0
VENTANAS	OTROS PTOS.JAPONESES	264,1	17265	0
VENTANAS	OTROS PTOS.SUECIA	8,2	15265	1
VENTANAS	OTROS PTOS.TAIWAN	7,8	18616	0
VENTANAS	SHANGAI	31,5	18799	0