



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINAS

**DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA DE CÁLCULO DE EMISIONES Y
EVALUACIÓN DE INICIATIVAS PARA LA DESCARBONIZACIÓN DE LA
INDUSTRIA MINERA DEL COBRE EN CHILE**

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN MINERÍA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL DE MINAS

CONSTANZA IGNACIA ARAYA IBARRA

**PROFESOR GUÍA:
WILLY KRACHT GAJARDO**

**PROFESOR CO-GUÍA:
EMILIO CASTILLO DINTRANS**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
DIEGO LIZANA ROJAS
OSVALDO URZÚA WINKLER**

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Advanced Mining Technology Center (AMTC)

SANTIAGO DE CHILE

2022

RESUMEN EJECUTIVO

El presente trabajo detalla el desarrollo e implementación de una herramienta de cálculo para determinar las emisiones de alcance 1, 2 y 3 en la industria minera del cobre en Chile, a partir de información detallada de las operaciones. Así, el objetivo principal consiste en cuantificar las emisiones del año 2019 como referencia y proyectar su comportamiento en el periodo 2020-2050.

La herramienta desarrollada e implementada se basa en la definición de dos tipos de variables principales. Por un lado, se definen tasas de consumo de insumos, factores de emisión y distancias claves para el transporte tanto de insumos como de productos. Por otro, se requiere incorporar las características relevantes de una operación minera como material movido, tratado, tipo de procesamiento, países de importación, cantidad de productos generados, entre otros.

Entre los principales hallazgos del trabajo realizado se destaca que la industria nacional habría emitido 28.2 MtCO_{2e} en el año base 2019 con una intensidad de emisiones de 4.8 tCO_{2e}/tmf Cu. Estando compuesta por un 19% de emisiones directas de alcance 1, un 33% de emisiones indirectas de alcance 2, y un 48% de emisiones de alcance 3. Si bien las emisiones por alcances 1 y 2 son similares a lo indicado por otras fuentes, los resultados permiten cuantificar emisiones alcance 3, de las cuales no existían estimaciones nacionales.

En el mismo año, se identifica la mina rajo como el proceso crítico para el alcance 1, para el alcance 2 la concentradora, y para el alcance 3 se definen como insumos críticos las bolas de molienda, el ácido sulfúrico, combustible, explosivos y cal. Tanto los procesos como los insumos críticos deberían ser una prioridad para la reducción de emisiones en la industria.

Al proyectar las emisiones totales al 2050 considerando solo la disminución natural de las leyes de cobre producto del envejecimiento de los yacimientos, al año 2050 se tendría una industria minera responsable de la generación de 66.3 MtCO_{2e}, lo que se traduce en un aumento del 135% con respecto al 2019.

Cuando se considera la proyección de las emisiones con la disminución de las leyes y el cambio de la matriz energética en el país se ve un cambio importante. Las emisiones de alcance 2 disminuyen en un 86% al 2050, mientras que las emisiones totales en un 33% si se comparan con el escenario anterior. Esto justifica el estudio de distintas iniciativas y tecnologías para descarbonizar la industria minera, ya que se ha puesto énfasis en la eficiencia energética y la inclusión de energías renovables para las propuestas de mitigación de emisiones en el largo plazo.

Como una de las conclusiones más importantes se tiene que la descarbonización de la industria considerando toda la cadena de valor no depende solo de una tecnología o iniciativa, es una combinación de estas la que entrega el mejor escenario. Además, estas tecnologías tienen distintos niveles de madurez tecnológica, necesidad de capitales de diferente magnitud y tiempos de implementación. Dicho esto, se requiere una priorización de estas tecnologías e iniciativas considerando un análisis multivariable en donde indicadores de sustentabilidad tengan una ponderación importante. En esa línea, la herramienta desarrollada es de gran utilidad al poder cambiar los parámetros afectados si es que se conocen las fuentes de emisión. Esta jerarquización debería facilitar y justificar la toma de decisiones de las compañías en la gestión de sus emisiones, y podría ser un insumo de interés para apoyar lineamientos de políticas públicas asociada a la impulsión de estas.

ABSTRACT

Based on detailed operations information, the current work develops and implements a tool for determining scope 1, 2, and 3 emissions in the copper mining industry in Chile. The aim is to quantify emissions and forecast their behavior between 2020 and 2050 based on 2019.

The developed and implemented tool is based on defining two types of variables. On the one hand, consumption rates of supplies, emission factors, and critical distances for transporting both supplies and products are defined. On the other hand, it is necessary to incorporate the characteristics of a mining operation, such as material moved, material treated, type of processing, countries of import, and quantity of products generated, among others.

Among the main findings of the study, it is highlighted that the national industry generated 28.2 MtCO₂e in the base year 2019, which is composed of 19% of direct emissions of scope 1, 33% of indirect emissions of scope 2, and 48% of scope 3 emissions. Although scope 1 and 2 emissions are similar to what other sources indicate, the results allow quantifying scope 3 emissions, of which there were no reliable national estimations.

In the same year, the open-pit mine is identified as the critical process for scope 1, while for scope 2 it is concentration, and for scope 3, grinding balls, sulfuric acid, fuel, explosives, and lime are defined as critical supplies. Both the processes and the critical supplies should be a priority for reducing emissions in the industry.

When projecting total emissions to 2050, considering only the natural decrease in copper grades due to aging deposits, by 2050, there would be a mining industry responsible for the generation of 66.3 MtCO₂e, which translates into an increase of 135% compared with year 2019.

A significant change is seen when considering the projection of emissions with the grades decrease and the imminent change of the energy matrix in the country. As a result, scope 2 emissions will decrease by 86% by 2050, while total emissions will increase by 33% compared to the previous scenario. This justifies the study of different initiatives and technologies to decarbonize the mining industry since the sector has placed particular emphasis on energy efficiency and the inclusion of renewable energies to make its proposals to reduce emissions in the long term.

One of the most important conclusions from this study is that decarbonization of the industry considering the entire value chain does not depend only on one technology or initiative; a combination of these provides the best scenario. In addition, these technologies have different levels of technological maturity, capital needs of varying magnitude, and implementation times. That said, prioritizing these technologies and initiatives is required considering a multivariate analysis where sustainability indicators have a substantial weight. This hierarchy should facilitate and justify companies' decision-making in managing their emissions and could be an input of interest to support public policy guidelines associated with promoting these.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN EJECUTIVO	ii
ABSTRACT	iii
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	1
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	1
1.3 ALCANCES.....	2
1.4 ESTRUCTURA DE LA TESIS	2
2. MARCO TEÓRICO.....	4
2.1 GASES DE EFECTO INVERNADERO (GEI).....	4
2.2 ALCANCES.....	4
2.3 GHG PROTOCOL	6
2.4 CONSUMO DE COMBUSTIBLE EN MINERÍA	7
2.5 CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN MINERÍA	9
2.6 EMISIONES INDUSTRIA MINERA EN CHILE	10
3. METODOLOGÍA.....	14
3.1 DESARROLLO HERRAMIENTA Y PROYECCIÓN DE EMISIONES.....	14
3.2 IMPACTO DE INICIATIVAS Y TECNOLOGÍAS EN LAS EMISIONES Y ANÁLISIS DE ESCENARIOS	18
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS	19
4.1 LÍMITE DE BATERÍA	19
4.2 SUPUESTOS	23
4.3 DESARROLLO HERRAMIENTA.....	23
4.4 EXCLUSIÓN DE CATEGORÍAS.....	25
4.4.1 Categoría 2: Bienes capitales.....	25
4.4.2 Categoría 5: Desechos generados en las operaciones	26
4.4.3 Categoría 6: Viajes de negocios.....	26
4.4.4 Categoría 8: Activos arrendados aguas arriba	26
4.4.5 Categoría 11: Uso de productos comercializados	26
4.4.6 Categoría 12: Disposición final de productos comercializados.....	26
4.4.7 Categoría 13: Bienes arrendados aguas abajo	26
4.4.8 Categoría 14: Franquicias.....	26

4.4.9 Categoría 15: Inversiones	26
4.5 EMISIONES INDUSTRIA DEL COBRE.....	27
4.5.1 Alcance 1	28
4.5.2 Alcance 2	29
4.5.3 Alcance 3	30
4.6 PROYECCIÓN DE EMISIONES	36
4.6.1 Proyección con disminución de leyes	36
4.6.2 Proyección con cambio en la matriz energética.....	39
4.6.3 Comparación de escenarios	43
4.7 IMPACTO DE INICIATIVAS Y TECNOLOGÍAS EN LAS EMISIONES Y ANÁLISIS DE ESCENARIOS	44
4.7.1 Electromovilidad.....	44
4.7.2 Hidrógeno verde.....	49
4.7.3 Operaciones más eficientes – Análisis de sensibilidad	53
4.7.4 Energías renovables.....	55
4.7.5 Eficiencia energética	56
4.7.6 Capacidad de fundiciones y refinerías	61
4.7.7 COVID-19	62
4.7.8 Soluciones basadas en la naturaleza.....	63
4.7.9 Compilación impacto de iniciativas y tecnologías.....	63
4.8 METAS DE LA INDUSTRIA	66
5. CONCLUSIONES	69
6. RECOMENDACIONES	72
BIBLIOGRAFÍA	73
ANEXOS.....	76
Anexo A Caracterización grupos	76
Anexo B Distribución emisiones insumos.....	76
Anexo C Factores de emisión	77
Anexo D Proyección ley de cobre largo plazo.....	77
Anexo E Proyección generación eléctrica en Chile	77

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Distribución alcances 1, 2 y 3 a lo largo de la cadena de valor. GHG Protocol.....	5
Figura 2: Evolución del consumo minero de combustible Cochilco, 2020d.	8
Figura 3: Distribución de consumo de combustible por procesos Cochilco, 2021b.	8
Figura 4: Evolución del consumo minero de energía eléctrica Cochilco, 2020d.	9
Figura 5: Distribución consumo de electricidad minería.	9
Figura 6: Emisiones directas indirectas de la minería del Cu en Chile.....	10
Figura 7: Distribución de emisiones alcance 1 por proceso globales.	11
Figura 8: Distribución de emisiones alcance 2 por procesos globales.....	11
Figura 9: Límite de batería sistema de estudio.	19
Figura 10: Límite de batería extracción y procesamiento.	20
Figura 11: Distribución de emisiones a nivel nacional año 2019.	27
Figura 12: Distribución emisiones alcance 1 año 2019.	28
Figura 13: Distribución emisiones mina rajo año 2019.	28
Figura 14: Distribución emisiones alcance 2 año 2019.	29
Figura 15: Distribución emisiones alcance 3 año 2019.	30
Figura 16: Factor de emisión por país.....	32
Figura 17: Distribución de emisiones alcance 3 según origen.	33
Figura 18: Distribución emisiones de insumos alcance 3.	34
Figura 19: Desglose participación de emisiones de insumos.	34
Figura 20: Distribución emisiones totales.	35
Figura 21: Proyección de emisiones caso BaU.	37
Figura 22: Proporción de los alcances en el total de emisiones.	37
Figura 23: Proyección intensidad de emisiones.	38
Figura 24: Intensidad de emisiones por alcance en cada año.	39
Figura 25: Proyección de emisiones con cambio en la matriz energética.....	40
Figura 26: Proporciones de los alcances con cambio en la matriz energética.	40
Figura 27: Proyección emisiones de alcance 2 con cambio en la matriz.	41
Figura 28: Proyección de intensidad de emisiones con cambio en la matriz energética.	42
Figura 29: Intensidad de emisiones por alcance caso cambio en la matriz.....	42
Figura 30: Comparación de emisiones totales ambos casos.....	43
Figura 31: Comparación escenarios intensidad de emisiones.	44
Figura 32: Número de CAEX nuevos por año y relación precio Cu, Cochilco, 2020a	45
Figura 33: Proyección de emisiones con cambio en la matriz energética e incorporación de CAEX E.....	46
Figura 34: Ahorro de combustible con CAEX eléctricos.	47
Figura 35: Participación de los alcances caso cambio en la matriz y CAEX E.	47
Figura 36: Intensidad de emisiones por alcance caso CAEX E con cambio matriz.	48
Figura 37: Comparación de escenarios cambio en la matriz.....	48
Figura 38: Comparación escenarios con cambio en la matriz y CAEX E.	49
Figura 39: Desarrollo proyectado de aplicaciones de hidrógeno verde Ministerio de Energía, 2020a.	50
Figura 40: Proyección de emisiones con CAEX HV y cambio en la matriz.....	51
Figura 41: Participación por alcance en el total, caso CAEX HV y cambio en la matriz.....	51
Figura 42: Intensidad de emisiones por alcance caso CAEX HV y cambio en la matriz.....	52

Figura 43: Comparación de escenarios: BaU, matriz, CAEX E, CAEX HV.....	53
Figura 44: Proyección reducción intensidad de consumo energía.....	57
Figura 45: Proyección de emisiones caso Matriz con EE Mina rajo.	58
Figura 46: Proyección intensidad de emisiones caso Matriz y EE Mina rajo.	58
Figura 47: Proporción por alcance caso Matriz y EE Mina rajo.	59
Figura 48: Proyección de emisiones cambio en la matriz y EE concentradora.....	59
Figura 49: Proyección de intensidad de emisiones caso Matriz y EE concentradora.....	60
Figura 50: Participación por alcance caso Matriz y EE concentradora.	61
Figura 51: Costos directos de fundición Cochilco, 2021d.	62
Figura 52: Comparación de iniciativas y tecnologías.	64
Figura 53: Impacto iniciativas/tecnologías total de emisiones al 2050.	65
Figura 54: Impacto iniciativas/tecnologías emisiones alcance 1 y 2 al 2050.....	66
Figura 55: Proyección ley de Cu al 2050.	77
Figura 56: Registro y proyección de la generación eléctrica en Chile Ministerio de Energía, 2020b.....	78

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Potencial de calentamiento global GHG Myhre et al., 2013.	4
Tabla 2: Descripción de categorías según GHG Protocol.....	6
Tabla 3: Evaluación comparativa empresas y operaciones con reporte de alcance 3.....	12
Tabla 4: Participación por tipo de combustible y poder calorífico. Fuente Cochilco, 2021b.	17
Tabla 5: Fuentes de emisión mina rajo.	20
Tabla 6: Fuentes de emisión mina subterránea.....	21
Tabla 7: Fuentes de emisión concentradora.	21
Tabla 8: Fuentes de emisión LX/SX/EW.....	21
Tabla 9: Fuentes de emisión fundición.	22
Tabla 10: Fuentes de emisión refinería.	22
Tabla 11: Fuentes de emisión servicios.	22
Tabla 12: Tasas de consumo por insumo.	24
Tabla 13: Tasas de consumo de energía Cochilco, 2020b.	25
Tabla 14: Emisiones e intensidad de emisiones nacional 2019.....	27
Tabla 15: Distribución emisiones Categoría 7 desplazamiento de trabajadoras-es.....	30
Tabla 16: Intensidad de emisiones transporte marítimo de productos.....	31
Tabla 17: Intensidad de emisiones FURE.	31
Tabla 18: Distribución emisiones de alcance 3 en el total.	32
Tabla 19: Proyección de emisiones escenario BaU.	36
Tabla 20: Proyección intensidad de emisiones.....	38
Tabla 21: Datos proyección intensidad de emisiones con cambio en la matriz energética.	41
Tabla 22: Intensidad de emisiones caso HV con cambio en la matriz.....	52
Tabla 23: Emisiones totales con cambio tasa de consumo bolas de molienda.....	54
Tabla 24: Emisiones totales con cambio tasa de consumo ácido sulfúrico.....	54
Tabla 25: Emisiones totales con cambio tasa de consumo explosivos.	55
Tabla 26: Parámetros afectados por las tecnologías/iniciativas.	64
Tabla 27: Metas de reducción de emisiones gran minería del cobre en Chile.	66

Tabla 28: Caracterización grupos.	76
Tabla 29: Distribución de emisiones insumos, alcance 3.....	76

1. INTRODUCCIÓN

La preocupación a nivel global producto del cambio climático y con ello la reducción de emisiones, se traducen en una minería aún más desafiante. Por lo anterior, es deseable que los procesos se adapten, que se consideren nuevas tecnologías y que se impulsen iniciativas que permitan tener una industria responsable baja en carbono.

Si el enfoque se pone en la industria minera del cobre, en los últimos años han tomado relevancia alternativas como el uso de paneles solares y la electromovilidad. Y a pesar de que las iniciativas que se presentan son una buena medida para la disminución de gases de efecto invernadero, estas presentan desafíos que no han sido resueltos completamente y que no tienen un horizonte fijo de aplicación.

Otro desafío importante se relaciona con el cálculo de las emisiones. Estas pueden ser clasificadas en 3 alcances; el alcance 1 corresponde a las emisiones directas, el alcance 2 a las indirectas relacionadas al consumo de energía eléctrica, y el alcance 3 a indirectas relacionadas con la cadena de valor. Tanto el alcance 1, como el alcance 2 son calculados, reportados y gestionados por las distintas empresas pertenecientes a la gran minería del cobre en el país, sin embargo, en el alcance 3 aún hay brechas que no han sido resueltas y que dificultan el cálculo y la gestión de estas.

El trabajo de tesis que se describe en este documento se titula “Desarrollo de una herramienta de cálculo de emisiones y evaluación de iniciativas para la descarbonización de la industria minera del cobre en Chile”, e intenta ser un aporte técnico para el cierre de brechas de los desafíos planteados anteriormente, definiendo las emisiones totales del sector minero, y determinando el impacto que tienen distintas tecnologías e iniciativas en la reducción de estas.

1.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una herramienta que permita estimar las emisiones de alcance 1, 2 y 3 de la industria minera del cobre, y entregar insumos técnicos que apoyen la formulación de políticas públicas para potenciar iniciativas y tecnologías que permitan disminuirlas en el largo plazo.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desarrollar una herramienta flexible que permita calcular las emisiones de alcance 1, 2 y 3 para una operación minera de cobre en Chile.
- Estimar las emisiones de alcance 1, 2 y 3 de la industria minera en Chile.
- Determinar las emisiones de CO₂e de una faena minera estándar en Chile y proyectarlas en el periodo 2020-2050.
- Caracterizar iniciativas y tecnologías que permitan reducir las emisiones en la industria minera.
- Estudiar el impacto en el largo plazo de las distintas iniciativas y tecnologías.
- Entrega de insumos técnicos para la formulación de políticas públicas.

1.3 ALCANCES

La herramienta de cálculo diseñada permite hacer estimaciones referenciales de las emisiones de alcance 1, 2 y 3 de una operación minera con un análisis *cradle to gate*. Para el alcance 1 se consideran solo tasas de consumo de combustible en las distintas etapas del proceso minero y no existen diferenciaciones entre equipos y maquinarias. Para el alcance 2 se consideran tasas de consumo promedio de energía en las distintas etapas del proceso. Y para el alcance 3, se sigue la metodología propuesta por *GHG Protocol*, tasas de consumo promedio de la industria y distancias promedio para las regiones mineras principales del país.

La herramienta de cálculo es capaz de distinguir por procesamiento de sulfuros y óxidos, por método de explotación a cielo abierto y subterránea con *block/panel caving*, por productos comercializables: cátodos EW, cátodos ER, y concentrado de Cu, y diferenciación por fundición y refinado de concentrado según si ocurre en Chile o en China, lo último considerando que es el principal exportador.

Los datos utilizados corresponden a valores del año 2019, ya que las condiciones operacionales que impuso la pandemia el año 2020 no sean lo suficientemente representativos para que estos sean extrapolables al 2050.

Para la proyección de las emisiones del mismo capítulo, solo se consideran los cambios en la producción de cobre en Chile (BaU), la matriz energética en el período 2020-2050, y algunas tecnologías. Esta sección no involucra evaluación económica de ningún tipo.

Cuando se determina el impacto de iniciativas y tecnologías, solo se estudia el impacto de estas en las emisiones de CO₂e en alcance 1, 2 y 3. Queda fuera del alcance determinar el costo que implica la inserción de ellas en la industria o cualquier evaluación económica en este capítulo.

Para el análisis de escenarios se presenta un caso base y sus derivaciones: escenario BaU (*business as usual*) considera como variables el cambio en la producción en función de la disminución de leyes, el caso Matriz toma en cuenta la disminución de leyes y el cambio en la matriz energética que debería ocurrir en el periodo 2020-2050, mientras que el impacto de tecnologías e iniciativas consideran tanto la disminución de leyes como el cambio en la matriz.

1.4 ESTRUCTURA DE LA TESIS

El trabajo de tesis pretende entregar una visión a largo plazo sobre el comportamiento de las emisiones en la industria minera del cobre y se divide en cuatro capítulos:

- **Capítulo 2 Marco teórico:** entrega los conceptos mínimos y claves para comprender los tópicos que se abordan en el trabajo, detallando nociones sobre gases de efecto invernadero (GEI), emisiones y sus alcances, la metodología para cuantificarlas, consumos críticos de la industria minera en Chile, las emisiones asociadas y reportadas hasta ahora en el sector.
- **Capítulo 3 Metodología:** este capítulo detalla los pasos a seguir para el desarrollo de la herramienta de cálculo que se utiliza para determinar las emisiones nacionales en el periodo 2020-2050, así como los supuestos definidos para el análisis de escenarios.
- **Capítulo 4 Resultados y análisis:** corresponde al capítulo principal del trabajo en el que inicialmente se define el límite de batería, los supuestos y exclusiones para el desarrollo

de la herramienta de cálculo, el desarrollo de la calculadora como tal, para luego de la extrapolación de los resultados cuantificar y mostrar las emisiones totales de la industria en el periodo de estudio, la cuantificación del impacto de algunas iniciativas, estudio de escenarios, y la comparación con las propuestas de la industria para la descarbonización.

- **Capítulo 5 Conclusiones:** en este capítulo se cierra el estudio con los resultados más importantes, así como el trabajo futuro relacionado al desarrollo de este trabajo.

2. MARCO TEÓRICO

Para llevar a cabo el trabajo de tesis es necesario detallar conceptos que se alejan del lenguaje técnico minero, y que se enfocan principalmente en gestión ambiental como lo son los tipos de gases, las distintas emisiones y sus alcances. Este capítulo busca abordar estos tópicos y cómo se conectan con la industria minera del cobre.

2.1 GASES DE EFECTO INVERNADERO (GEI)

También conocidos como GHG por su sigla en inglés (*Greenhouse Gases*), son aquellos gases que son capaces de atrapar el calor en la atmósfera (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, 2021). Para los fines de este trabajo y siguiendo la metodología de *GHG Protocol*, estos son los seis gases listados en el Protocolo de Kyoto (Nations, 1997): dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), hidrofluorocarbonos (HFCs), perfluorocarbonos (PFCs), y hexafluoruro de azufre (SF₆).

Además, estos gases pueden ser descritos según el potencial de calentamiento global, GWP por su sigla en inglés (*Global Warming Potential*), que se define como el factor de daño a la atmósfera de una unidad de un GEI relativo a una unidad de CO₂ en un periodo específico (WBCSD & WRI, 2012), estos factores se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 1: Potencial de calentamiento global GHG Myhre et al., 2013.

GEI	GWP a 100 años
Dióxido de carbono (CO ₂)	1
Metano (CH ₄)	28
Óxido nitroso (N ₂ O)	265
Hidrofluorocarbonos (HFCs)	4 - 12,400
Perfluorocarbonos (PFCs)	6,630 – 11,100
Hexafluoruro de azufre (SF ₆)	23,500

Fuente: Elaboración propia con datos de Myhre et al., 2013.

Considerando el potencial de calentamiento de cada uno de los GEI que se muestran en la Tabla 1, se establece una unidad de medida universal conocida como dióxido de carbono equivalente o CO₂e, llevando todo a una unidad básica común (WBCSD & WRI, 2012). Importante notar de la misma tabla que tanto los HFCs como los PFCs tienen un amplio rango de GWP, esto ocurre porque existe una extensa lista de elementos que pertenecen a esas categorías.

2.2 ALCANCES

Las emisiones generadas en la producción de un elemento cualquiera pueden ser clasificadas en tres categorías según los límites de la organización y se detallan a continuación:

- **Alcance 1:** emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) directas que provienen de fuentes que son propiedad o son controladas por la empresa (WBCSD & WRI, 2012).
- **Alcance 2:** emisiones indirectas de GEI asociadas a la producción de energía que es utilizada en las dependencias de la empresa (WBCSD & WRI, 2012).
- **Alcances 3:** emisiones indirectas que no están controladas por la empresa y que se asocian a la cadena de valor de la empresa (WBCSD & WRI, 2012).

Los distintos alcances, según *GHG Protocol* se pueden representar con el siguiente esquema:

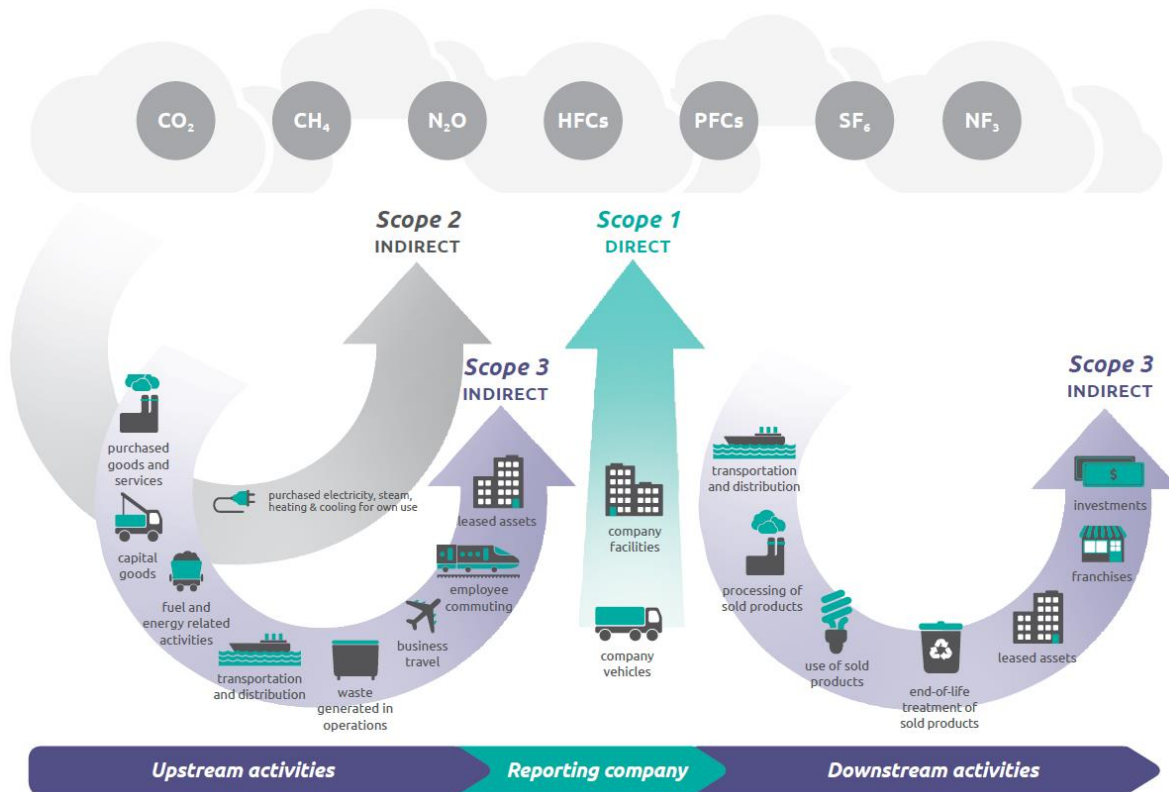


Figura 1: Distribución alcances 1, 2 y 3 a lo largo de la cadena de valor. *GHG Protocol*.

Las distintas categorías que se pueden identificar en la Figura 1 están generalizadas para cualquier tipo de producto y cualquier tipo de empresa, esto quiere decir, que no toma ninguna particularidad de la industria minera del cobre. En esta misma línea, la industria minera en Chile ha sido capaz de identificar, cuantificar y reportar tanto los alcances 1 y 2. Sin embargo, por las características del alcance 3, que toma emisiones aguas arriba y aguas abajo de la cadena de valor y tiene diferencias importantes si se calculan las emisiones de una operación o de una compañía minera, se hace muy complejo tener control sobre estas, a pesar de eso, la industria minera ha sido capaz de cuantificar, y en algunos casos reportar. Pero el límite de batería de cada una de ellas así como la metodología, difiere entre una compañía y otra, lo que dificulta la comparación.

2.3 GHG PROTOCOL

Para el desarrollo de la tesis se decide utilizar la metodología establecida por *GHG Protocol* dado que ha sido la utilizada por las empresas mineras que han calculado sus emisiones de alcance 3.

GHG Protocol es la herramienta internacional más conocida y utilizada a nivel mundial para la elaboración de GEI de tipo voluntario (AEC, 2019). Este protocolo fue desarrollado por el *World Resource Institute (WRI)* y el *World Business Council for Sustainable Development (WBCSD)*.

Esta metodología caracteriza las fuentes de emisiones de los alcances 1, 2 y 3, además, indica la forma de calcularlas. Es importante tener en cuenta, que para una misma categoría o fuente de emisión existe más de una forma de estimarla dependiendo de los datos disponibles. Por lo mismo, en la sección 3 METODOLOGÍA se detallan las ecuaciones utilizadas en cada caso.

Para el alcance 1, emisiones ocurridas por fuentes propias o controladas por la compañía, *GHG Protocol* indica que las actividades (WBCSD & WRI, 2012) que debieran ser reportadas son las siguientes:

- Generación propia de energía eléctrica, calor o vapor.
- Procesamiento físico o químico.
- Transporte de materiales.
- Emisiones fugitivas.

Con respecto a las emisiones indirectas y en función de *GHG Protocol*, el alcance 2 se calcula de forma directa conociendo la cantidad de energía eléctrica requerida por la compañía u operación en un tiempo fijo. Las emisiones indirectas de alcance 3 se dividen en 15 categorías y se describen a continuación:

Tabla 2: Descripción de categorías según *GHG Protocol*.

Categoría	Descripción
1. Adquisición de bienes y servicios	Extracción, producción y transporte de bienes y servicios comprados y adquiridos por la compañía en el año de reporte.
2. Bienes capitales	Extracción, producción y transporte de bienes capitales comprados o adquiridos por la compañía en el año de reporte.
3. Actividades relacionadas a energía y combustible (no incluidas en alcance 1 o 2)	Extracción, producción y transporte de combustible y energía comprada o adquirida por la compañía en el año de reporte que no fueron consideradas en alcance 1 o 2 <ul style="list-style-type: none"> - Extracción, producción y transporte de combustibles usados por la compañía. - Extracción, producción y transporte de combustibles consumidos en la generación de electricidad utilizada por la compañía. - Pérdidas del sistema de transmisión y distribución de energía eléctrica. - Generación de electricidad comprada y se vende a usuarios finales.
4. Transporte y distribución aguas arriba	Transporte y distribución de productos y servicios adquiridos por la compañía en el año de reporte (en vehículos e instalaciones que nos son controladas por la compañía).
5. Desechos generados en las	Depósito y tratamiento de desechos generados en las operaciones por

operaciones	la compañía.
6. Viajes de negocios	Transporte de trabajadores/as para viajes relacionados a actividades de la compañía.
7. Desplazamiento de trabajadores/as	Transporte de trabajadores/as de la compañía entre sus hogares y su lugar de trabajo durante el año de reporte.
8. Activos arrendados aguas arriba	Operaciones de bienes arrendados por la compañía en el año de reporte que no están incluidos en alcance 1 o 2.
9. Transporte y distribución aguas abajo	Transporte y distribución de productos vendidos por la compañía en el año de reporte al consumidor final.
10. Procesamiento de productos comercializados	Procesamiento de productos intermedios comercializados por compañías aguas abajo (ej: manufactura).
11. Uso de productos comercializados	Uso final de bienes y servicios comercializados por la compañía en el año de reporte.
12. Disposición final de productos comercializados	Disposición y tratamiento de desechos en la vida final de productos comercializados por la compañía.
13. Bienes arrendados aguas abajo	Operación de activos que son propiedad de la compañía y que son arrendados por otras entidades
14. Franquicias	Operaciones de franquicias en el año de reporte.
15. Inversiones	Operaciones de inversiones de la compañía.

Fuente: Elaboración propia con datos de WBCSD & WRI, 2013.

Como se menciona anteriormente, las categorías propuestas que se muestran en la Tabla 2 se caracterizan para una empresa cualquiera y no específicamente para una faena minera. Esto significa que no todas las categorías aplican en un cálculo particular.

Así mismo, las empresas mineras que han reportado las emisiones de alcance 3 con este protocolo no lo hacen para las mismas categorías. Esto se traduce en dificultades para comparar las emisiones de alcance 3 entre distintas operaciones mineras.

2.4 CONSUMO DE COMBUSTIBLE EN MINERÍA

Los combustibles utilizados en la industria minera tienen gran relevancia ya que participan en las emisiones directas de alcance 1 y las indirectas de alcance 3 a través del transporte asociado a este insumo y la producción de este.

El 2019, según Cochilco, (2020d), del total de energía consumida en la industria, el 48.7% corresponde a la energía generada por combustibles, esta proporción se ha mantenido casi constante en el período 2009-2019.

En la Figura 2 se puede ver cómo ha evolucionado el consumo de combustible en la industria minera del cobre en los últimos 10 años.

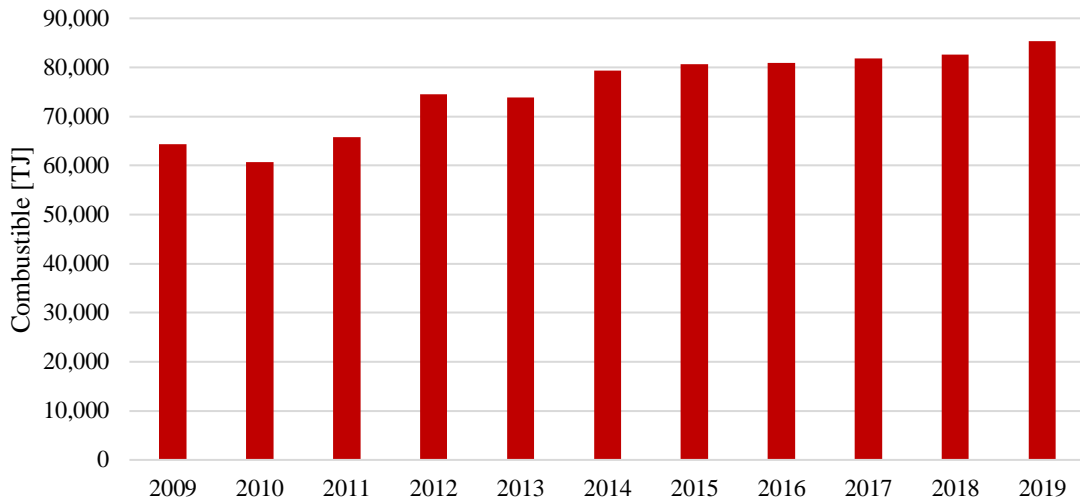


Figura 2: Evolución del consumo minero de combustible Cochilco, 2020d.

Se puede ver de la Figura 2 que el uso de combustibles ha tenido una evolución creciente, llegando a un total de 85,000 TJ, lo que significa un crecimiento del 33% desde el 2009.

De forma adicional, el uso de combustibles se divide en 90.4% diésel, 4.4% Enap 6, 4.3% gas natural, 0.6% kerosene, 0.1% gas licuado, y 0.1% gasolina (Cochilco, 2021b).

Para complementar los datos del gráfico anterior, se muestra a continuación la distribución de uso de combustibles según proceso minero:

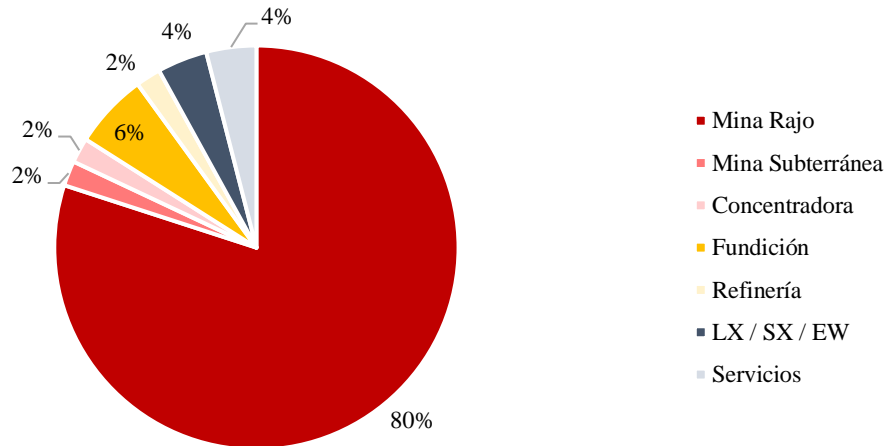


Figura 3: Distribución de consumo de combustible por procesos Cochilco, 2021b.

De la Figura 3, se observa que la mayor demanda de combustibles se origina en la mina rajo, esto producto de los equipos utilizados para el transporte del material fragmentado. Este combustible corresponde al consumo total de la industria minera en Chile, es decir, minería a rajo abierto y minería subterránea, procesamiento de sulfuros y procesamiento de óxidos.

Finalmente, al comparar el consumo de la industria minera del cobre con el consumo nacional, se tiene que el 2019 la minería del cobre era responsable de un 19.8% del consumo de diésel del país (Cochilco, 2020c), dato que toma relevancia a la hora de estimar las emisiones.

2.5 CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN MINERÍA

La demanda energética de la industria minera es crucial en el cálculo de las emisiones de alcance 2, por lo que se torna relevante caracterizarla. Esta corresponde al 51.3% del total de la energía consumida en la minería y ha ido evolucionando en los últimos 10 años como se muestra en el siguiente gráfico.

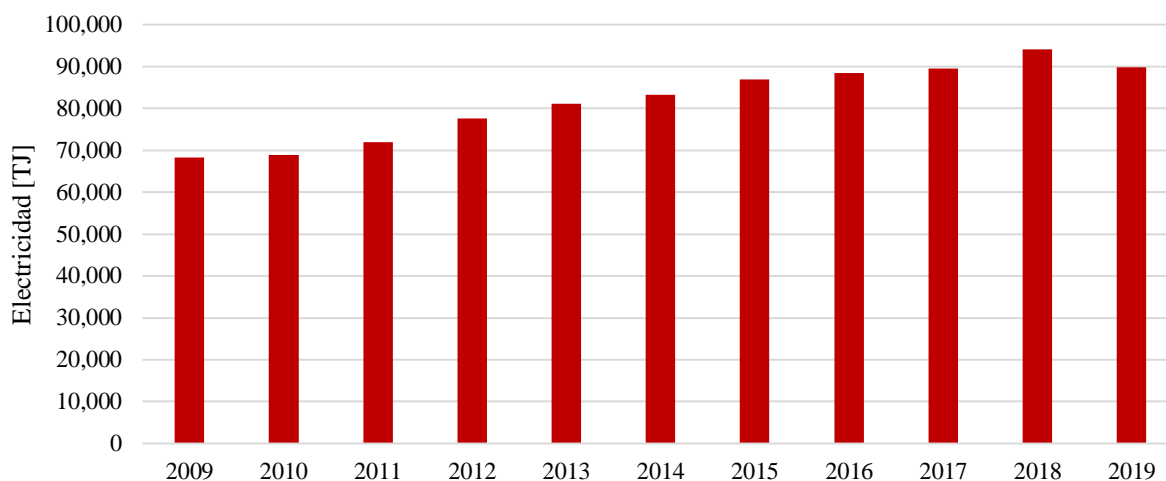


Figura 4: Evolución del consumo minero de energía eléctrica Cochilco, 2020d.

Se puede ver de la Figura 4 que el uso de energía eléctrica ha tenido una evolución creciente, llegando a un total de 90 PJ (petajoule 10^{15}), lo que significa un crecimiento del 31% desde el 2009. Para complementar los datos se muestra la distribución de energía por proceso:

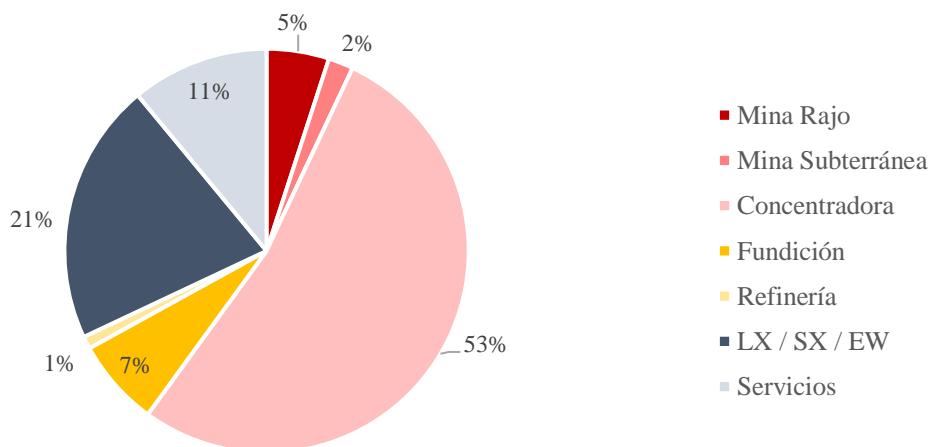


Figura 5: Distribución consumo de electricidad minería.

De la Figura 5 queda en evidencia que el 53% de la energía eléctrica consumida en la industria minera del cobre es producto de la concentradora, particularmente por los equipos de conminución, seguida por LX/SX/EW con un 21%, y Servicios con un 11%, los otros procesos tienen una participación menor o igual al 7%. Esta composición se hace relevante para los procesos en los que se identifican mayores oportunidades de mejora.

Finalmente, al comparar la demanda energética nacional con la industria minera, esta última representa el 33% del consumo nacional (Cochilco, 2021b).

2.6 EMISIONES INDUSTRIA MINERA EN CHILE

Tanto las emisiones de alcance 1 como de alcance 2 están bien identificadas, cuantificadas y reportadas en la industria. Es así, que entidades como Cochilco publican periódicamente en su reporte anual las emisiones de alcance 1 y 2 del sector minero. Los últimos datos reportados entregan información del periodo 2011-2019 tal como se muestra en el siguiente gráfico.

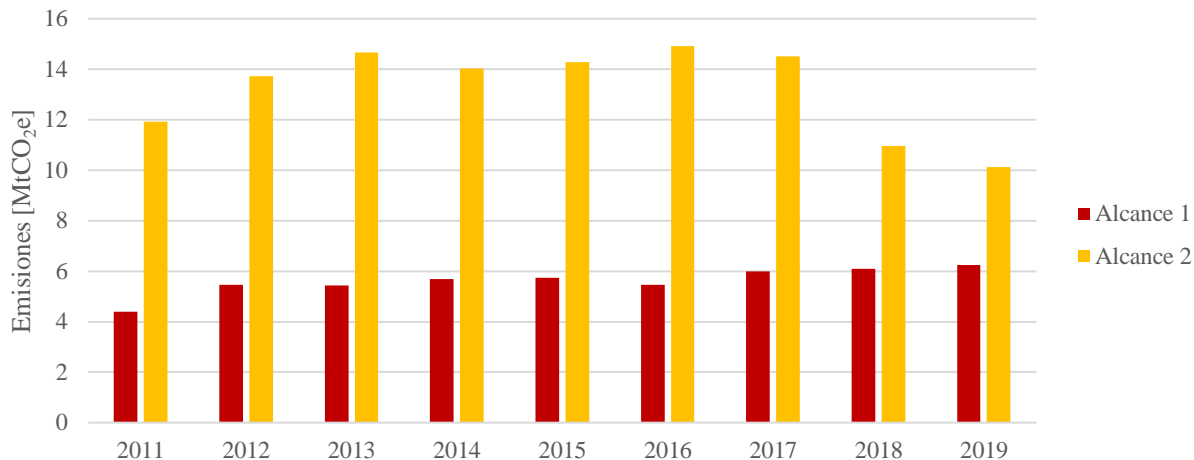


Figura 6: Emisiones directas e indirectas de la minería del Cu en Chile.
Fuente: Elaboración propia con datos de (Cochilco, 2021a)

Como se puede desprender del gráfico, las emisiones de alcance 2 van en aumento hasta el 2017 y en 2018 sufre una abrupta caída de casi 3.6 millones de toneladas, justificadas por la interconexión del Sistema Interconectado Central (SIC) y el Sistema Interconectado del Norte Grande (SING) dando origen al Sistema Eléctrico Nacional (SEN). Este suceso hizo que el factor de emisión del SING pasara de 0.77 tCO₂e/MWh en 2017, a 0.42 tCO₂e/MWh en 2018 (Energía, 2021).

Analizando los datos del mismo gráfico, entre el 2011 y el 2017 las emisiones de alcance 1 representaron entre el 27% y el 29%, mientras que las emisiones de alcance 2 fueron entre un 71% y un 73%. Una vez que cambia el factor de emisión de la matriz energética, las emisiones de alcance 2 representan el 63% aproximadamente y el alcance 1 el 37%.

Si las emisiones de cada uno de los alcances se desglosan según el proceso, se tiene la siguiente distribución:

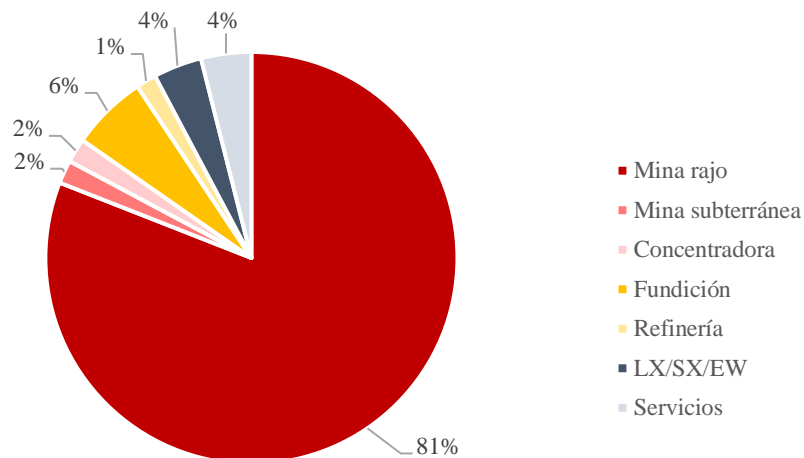


Figura 7: Distribución de emisiones alcance 1 por proceso globales.
Fuente: Elaboración propia con datos de Cochilco, 2021a.

Se ve claramente de la Figura 7 que la mayor cantidad de emisiones directas, asociadas a la quema de combustible corresponde a las actividades asociadas a Mina Rajo. Esto particularmente por la gran cantidad de combustible utilizado en los camiones de gran tonelaje utilizados para el transporte de material. El resto de los procesos tiene una participación menor al 6%. Es importante identificar que este gráfico tiene una fuerte relación con la Figura 3, la que muestra el consumo de combustible, las variaciones se deben a los factores de emisión del tipo de combustible o los equipos utilizados para los cálculos.

Ahora, estudiando la distribución de emisiones de alcance 2 se tiene:

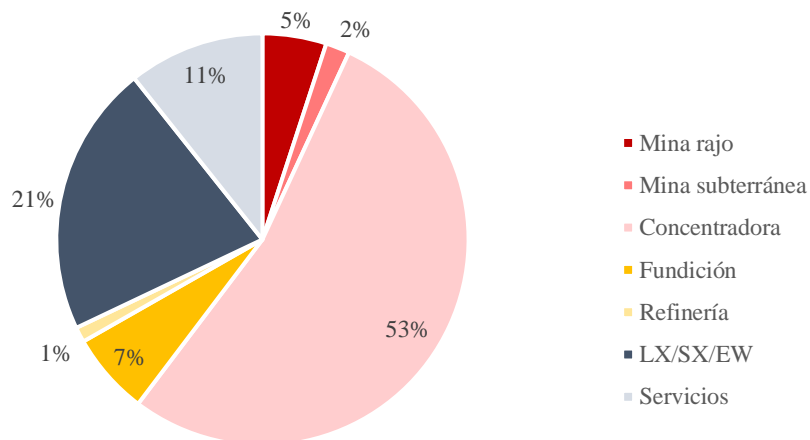


Figura 8: Distribución de emisiones alcance 2 por procesos globales.
Fuente: Elaboración propia con datos de Cochilco, 2021a.

De la Figura 8 queda en evidencia que el área de mayor consumo energético es la que corresponde con la mayor cantidad de emisiones. Así, el 53% de las emisiones corresponde a la

Concentradora, esto se debe a la gran cantidad de energía eléctrica que se requiere para los equipos de molienda. Lo siguen los procesos relacionados con la hidrometalurgia, LX/SX/EW con un 23% del total, Servicios con un 11% y el resto tienen una participación menor al 7%.

Con respecto a las emisiones de alcance 3 reportadas por las empresas, la operación pionera en este cálculo en Chile fue Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi en su reporte “Medición de la huella de carbono” publicada el año 2011. El reporte tiene una periodicidad anual, y presenta mejoras continuas en los cálculos y el alcance del límite de batería.

Además de Collahuasi, no hay ninguna otra empresa que publique sus emisiones de alcance 3 a nivel de operación, sin embargo, varias lo publican a nivel de compañía. Esto genera distinciones importantes en la cantidad de categorías consideradas de la metodología GHG *Protocol*. Y dado esto, grandes diferencias en los órdenes de magnitud de los resultados. A continuación, se presenta una evaluación comparativa de las empresas y operaciones que reportan las emisiones indirectas de alcance 3.

Tabla 3: Evaluación comparativa empresas y operaciones con reporte de alcance 3.

Categoría		Collahuasi	BHP	Río Tinto	AngloAmerican
1	Adquisición de bienes y servicios	✓	✓	✓	✓
2	Bienes capitales	-	-	✓	✓
3	Actividades relacionadas a energía y combustible no incluidas en alcances 1 y 2	✓	✓	✓	✓
4	Transporte aguas arriba	✓	✓	✓	✓
5	Desechos generados en las operaciones	✓	-	-	✓
6	Viajes de negocios	✓	✓	✓	✓
7	Desplazamientos trabajadores/as	-	✓	✓	✓
8	Activos arrendados aguas arriba	-	-	-	-
9	Transporte aguas abajo	✓	✓	✓	✓
10	Procesamiento de productos comercializados	✓	✓	✓	✓
11	Uso de productos comercializados	-	✓	✓	✓
12	Disposición final de productos comercializados	-	-	-	✓
13	Bienes arrendados aguas abajo	-	-	-	-
14	Franquicias	-	-	-	✓
15	Inversiones	-	✓	-	✓

Fuente: Elaboración propia con datos de Collahuasi, 2020; BHP, 2019; Río Tinto, 2020; y AngloAmerican, 2020.

De la evaluación comparativa, se puede ver cómo varían la cantidad y el tipo de categorías consideradas, mientras Collahuasi reporta 7 categorías, Anglo American reporta 14 de las 15 categorías, dejando solo fuera la categoría 13 bienes arrendados aguas abajo. Es importante

considerar, además, que BHP, Rio Tinto y AngloAmerican cuentan con operaciones en todo el mundo, extracción de distintos minerales, y venta de variados productos y que lo reportan como un todo.

3. METODOLOGÍA

Esta sección detalla el proceso realizado para lograr la estimación de las emisiones de la minería del cobre y las fuentes de información utilizadas para ello.

3.1 DESARROLLO HERRAMIENTA Y PROYECCIÓN DE EMISIONES

El desarrollo de la herramienta de cálculo requiere primero definir el límite de batería con el que se va a trabajar, esto para poder ajustar el problema de tal forma que haya información suficiente para los cálculos, y que además los resultados sean representativos.

En particular, para el alcance 1 se consideran los procesos asociados al consumo de combustible utilizado, en el alcance 2 dependen únicamente del consumo de energía eléctrica. Para cuantificar el alcance 3 se requiere identificar los insumos utilizados y productos generados, y con ello se definen como fuentes de emisión el ciclo de vida de los insumos, y el transporte marítimo y/o terrestre según corresponda.

Finalmente, se procede a recopilar la información necesaria para levantar una base de datos que permita hacer los cálculos. Esta información corresponde a:

- Tasas de consumo de insumos utilizados en cada uno de los procesos.
- Origen de los insumos. Si es nacional es importante conocer la región de procedencia, y si es internacional es necesario conocer el país donde fue producido.
- Distancia terrestre promedio de la mina a la ciudad más importante.
- Distancia terrestre promedio de la ciudad más importante al puerto principal de la región.
- Distancia marítima del puerto minero más importante del país a cada uno de los países de exportación.
- Factores de emisión de las distintas fuentes de emisión.

Con la información recopilada, se construye la base de datos principal para los cálculos. Esta base de datos tiene como objetivo simplificar los análisis posteriores y cuenta con variables como el tipo de tratamiento del mineral, la etapa en la que participa, el tipo de insumo o de producto, la fuente de emisión, la tasa de consumo, el consumo anual, la distancia terrestre y/o marítima, el factor de emisión asociado y finalmente las emisiones de CO₂ equivalente.

A continuación, se detallan las ecuaciones utilizadas para el cálculo de las emisiones en cada uno de sus alcances:

- **Alcance 1, combustibles:**

$$Emisiones_i [CO_2e] = Combustible_i \cdot FE \quad (1)$$

Con el combustible medido como masa o volumen que combustiona en el proceso, y FE el factor de emisión como CO₂e por unidad de masa o volumen (U.S. EPA, 2020).

- **Alcance 1, explosivos:**

Para el cálculo de emisiones directas producto de la tronadura, se utiliza el ANFO como explosivo dado que es el más utilizado. De esta forma, y asumiendo que la combustión es

completa, se calcula el factor de emisión utilizando la reacción de descomposición del sistema como:



Ecuación que indica que el único componente que es parte de los GEI, y por lo tanto se requiere conocer las emisiones, es el CO_2 . Además, todo el carbono que se genera como CO_2 viene del CH_2 , en donde el carbono tiene una proporción del 85.6%. Adicionalmente, la composición del ANFO es 94.5% nitrato de amonio, y el resto corresponde a *fuel oil*. De esta forma, por cada tonelada de ANFO utilizado participan 47.08 kg de carbono en la reacción. Esto significa que se generan 172.45 kg de CO_2 . Obteniendo así, un factor de emisión de 172.45 kg CO_2 /t explosivo.

- **Alcance 2:**

$$Emisiones_i [CO_2e] = Energía_i \cdot FE \quad (3)$$

Con la energía consumida en MWh por proceso y FE el factor de emisión como CO_2e por kWh consumida (WRS, 2014).

- **Alcance 3**

Previo a especificar los cálculos de las categorías de alcance 3, se debe mencionar que *GHG Protocol* entrega distintos métodos para cuantificar cada una de las categorías, dependiendo de la información que se tenga disponible. Sin embargo, hay algunos que se ajustan más a la realidad que otros.

- Categoría 1 Adquisición de bienes y servicios:

$$Emisiones [CO_2e] = Cantidad\ insumo \cdot FE \quad (4)$$

Con la cantidad de insumo medido en masa o volumen y FE el factor de emisión como CO_2e por unidad de masa o volumen (WBCSD & WRI, 2013).

- Categoría 3 Actividades relacionadas a energía y combustible:

$$Emisiones [CO_2e] = Cantidad\ energía \cdot FE \quad (5)$$

Con la cantidad de combustible medido en masa o volumen y FE el factor de emisión del ciclo de vida del combustible como CO_2e por unidad de masa o volumen (WBCSD & WRI, 2013).

- Categoría 4 Transporte aguas arriba:

$$Emisiones [CO_2e] = Cantidad\ insumo \cdot Distancia \cdot FE \quad (6)$$

Con la cantidad de insumo medido en masa o volumen, la distancia recorrida desde el puerto a la operación, desde la región de producción a la operación o desde el puerto internacional al puerto nacional en km, y FE el factor de emisión como CO₂e por masa o volumen por km recorrido. (WBCSD & WRI, 2013).

- Categoría 7 Desplazamientos trabajadoras/es:

$$Emisiones [CO_2e] = Distancia \cdot 2 \cdot T \cdot Dias \cdot FE + Teletrabajo \quad (7)$$

Con la distancia promedio de la casa a la operación, T el número de trabajadoras/es, Días la cantidad de días trabajados anualmente, FE el factor de emisión medido en CO₂e por km recorrido por persona (WBCSD & WRI, 2013), y el teletrabajo medido como:

$$Emisiones\ Teletrabajo [CO_2e] = Energía\ consumida \cdot FE \quad (8)$$

Con la energía consumida en kWh y FE el factor de emisión medido en CO₂e por kWh consumido (WBCSD & WRI, 2013)

- Categoría 9 Transporte aguas abajo:

$$Emisiones [CO_2e] = Cantidad\ producto \cdot Distancia \cdot FE \quad (9)$$

Con la cantidad de producto medido en masa o volumen, la distancia recorrida desde el puerto a la operación, desde la región de producción a la operación o desde el puerto nacional al puerto internacional en km, y FE el factor de emisión como CO₂e por masa o volumen por km recorrido (WBCSD & WRI, 2013). Para medir la cantidad de concentrado generado y transportado al exterior considerar la cantidad de agua contenida.

- Categoría 10 Procesamiento de productos comercializados:

$$Emisiones [CO_2e] = Energía \cdot FE \quad (10)$$

Con Energía como la cantidad de energía y combustible utilizado para procesar el concentrado en fundiciones internacionales, por el factor de emisión correspondiente al combustible y la electricidad según corresponda (WBCSD & WRI, 2013).

Es importante tener en cuenta que *GHG Protocol*, para algunas categorías, entrega más de un método de cálculo de emisiones. Una de las que ha sido más considerada por la industria, particularmente para las categorías 1 y 2 del alcance 3, debido a su facilidad de uso corresponde al método basado en gastos. Esto quiere decir que el factor de emisión tiene unidades de CO₂/\$.

Se descarta esta metodología puesto que no permite hacer una diferenciación entre insumos “verdes” y porque lleva a grandes sobre estimaciones.

Adicionalmente, los parámetros operacionales de entrada a la herramienta de cálculo corresponden a: ubicación de la faena, método de explotación, material movido y procesado, días trabajados anuales, tipo de proceso, producción de cátodos y/o concentrado, país de exportación principal, número de personas trabajando, y si tienen o no fundición.

Con la herramienta operativa se procede a extrapolar la información de operaciones a la realidad nacional. Esto se logra haciendo una caracterización de la gran minería del cobre en Chile y generando distintas agrupaciones de minas que tengan características similares respecto al tipo de procesamiento, ubicación, método de explotación y productos comercializados. Luego, conociendo la producción de cobre a nivel nacional para un año base, que en este estudio corresponde al 2019, y la producción de cada una de las agrupaciones generadas se obtiene el porcentaje de producción que le corresponde a cada grupo, es decir, se tiene:

$$\frac{\text{Producción Grupo 1}}{\text{Producción nacional}} + \frac{\text{Producción Grupo 2}}{\text{Producción nacional}} + \dots + \frac{\text{Producción Grupo n}}{\text{Producción nacional}} = 1 \quad (11)$$

La ecuación anterior además indica que si los grupos son lo suficientemente pequeños estos corresponderían a cada una de las operaciones existentes en Chile, caso ideal, y de esta forma disminuiría el error asociado.

Con el cálculo de emisiones totales del año base y el análisis de resultados correspondiente, se hace la proyección de estas en función de la producción esperada de cobre al 2050. Se mantienen las proporciones de las agrupaciones en el largo plazo.

Para la proyección de producción de cobre en Chile al 2030 se utiliza la información de Cochilco (2019) mientras que para la proyección del 2030 al 2050 se considera la producción esperada de Chile que corresponde a casi 9 Mt al 2050 según lo que plantea la Política Nacional Minera (Ministerio de Minería, 2021). Los años entre la meta de la PNM al 2050 y la producción esperada al 2030 se interpola linealmente.

Con la información obtenida de producción de cobre en el largo plazo, la evolución de los yacimientos, y con ello la profundidad de los rajos (aumento de REM) y la disminución de las leyes como se detalla en el Anexo D Proyección ley de cobre largo plazo, se obtienen las emisiones de alcance 1, 2 y 3.

Para determinar la composición de combustibles utilizados en la industria minera y con la intención de que los cálculos sean lo más cercanos a la realidad, se utilizan las siguientes ponderaciones con información pública obtenida de Cochilco:

Tabla 4: Participación por tipo de combustible y poder calorífico. Fuente Cochilco, 2021b.

Combustible	Poder calorífico [MJ/m ³]	Participación
Diésel	39,952.0	90.4%
Enap 6	42,167.3	4.4%
GNL	31.7	4.3%
Kerosene	37,619.0	0.6%
Gas licuado	26,235.0	0.1%

Gasolina	34,773.0	0.1%
----------	----------	------

Las emisiones de alcance 1 se calculan considerando la participación de los combustibles de la Tabla 4.

3.2 IMPACTO DE INICIATIVAS Y TECNOLOGÍAS EN LAS EMISIONES Y ANÁLISIS DE ESCENARIOS

Conociendo las emisiones de alcance 1, 2 y 3 y su proyección al 2050, se describen iniciativas y tecnologías que permitirían disminuir estas emisiones en el largo plazo. Para esto, primero se describen y caracterizan las iniciativas contemplando cómo se está llevando a cabo esto en Chile, cuáles son los parámetros dentro de la base de datos creada que se ven afectados, qué alcance/s disminuye/n y si existe alguna problemática asociada a la inserción de estas tecnologías o la adaptación de las iniciativas en la industria.

Considerando la dificultad que significa cuantificar las emisiones en el largo plazo con la inserción de ciertas tecnologías, solo se estima la proyección de inserción de camiones mineros (CAEX) eléctricos, hidrógeno verde, eficiencia energética, y operaciones más eficientes. El resto de las tecnologías e iniciativas se estudia de forma cualitativa.

Para el caso de los CAEX, y con el objetivo de medir el impacto, se toma como supuesto una inserción de la tecnología al 2025 con un 10% de camiones eléctricos en la industria aumentado en esta misma razón 10% hasta llegar al 2050 con un 60% de camiones eléctricos. Luego de eso se calculan las emisiones de alcance 1 y 3 que disminuyen y cómo eso reduce la cantidad de combustible utilizado. Este combustible se transforma en energía y se multiplica por un factor de eficiencia del 90% ya que los motores eléctricos son más eficientes que los de combustión.

Para la eficiencia energética se toma como insumo principal los compromisos de eficiencia energética de las grandes operaciones mineras en Chile junto con el Consejo Minero. Además, entendiendo que la eficiencia energética tiene varias dimensiones, solo se considera la influencia de tener operaciones de reducción de tamaño más eficientes. Se toma una implementación progresiva en el periodo 2020-2050.

En la iniciativa operaciones más eficientes, se considera el impacto de tener un consumo de insumos más eficiente y/o responsable. Esto quiere decir que, de los insumos críticos, determinados en la sección anterior según el aporte que tienen en las emisiones de alcance 3, se estudian tasas de consumo menores para ver cómo estas afectan en las emisiones totales en el largo plazo.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Previo a mostrar los resultados obtenidos de la herramienta de cálculo y la extrapolación de estos valores a la realidad nacional, se detalla el límite de batería seleccionado para el estudio, así como los supuestos que se tomaron durante el desarrollo de la herramienta.

4.1 LÍMITE DE BATERÍA

Entendiendo la extensión del sistema en el que se enmarca la industria minera, se define un límite de batería tal que permita identificar los procesos más importantes y que requieran datos disponibles y públicos para el cálculo de emisiones.



Figura 9: Límite de batería sistema de estudio.
Fuente: Elaboración propia.

Se define como límite de batería el que se muestra en la Figura 9, por lo que quedan fuera del estudio las emisiones generadas en la manufactura de productos que utilizan como materia prima el cobre, la utilización de los productos y la disposición final de estos o su posible reciclaje. Estas etapas de la vida del cobre se dejan fuera por la complejidad de hacer la trazabilidad de productos y sus usos, sin embargo, estas deberían ser consideradas en un estudio más profundo entendiendo que tanto la utilización de productos tecnológicos como la manufactura de estos son fundamentales en la demanda del cobre y con ello en las emisiones que se generan.

Dada las particularidades de la mineralogía del cobre y métodos de explotación, se detallan las distintas etapas y procesos para la obtención de un cátodo de cobre como se muestra en la siguiente ilustración.

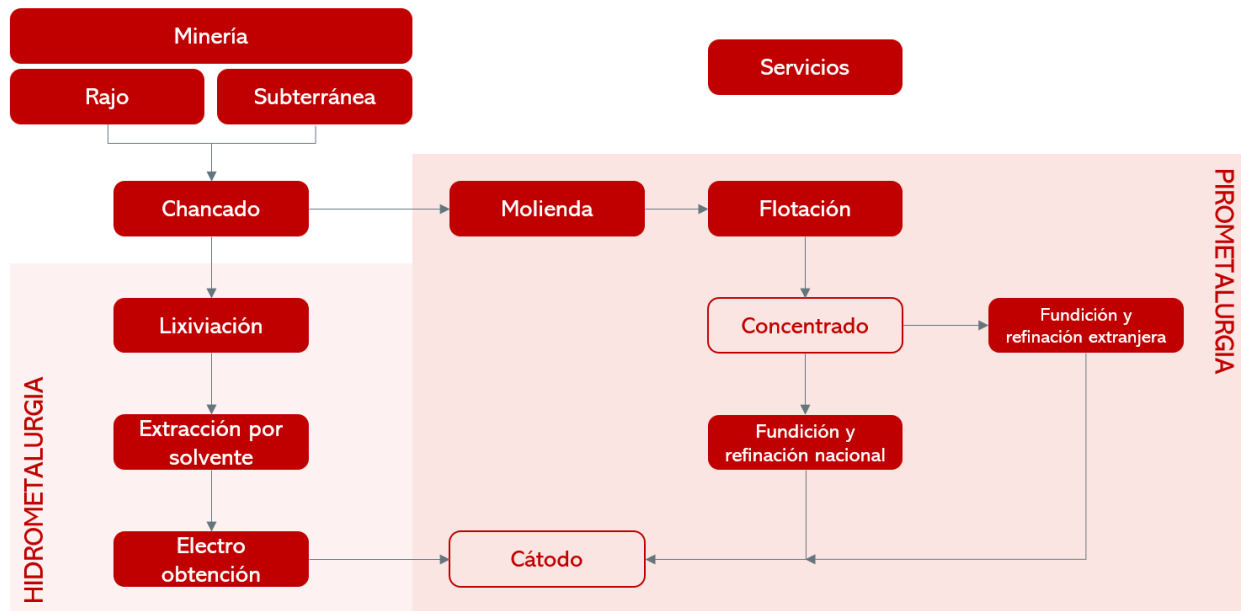


Figura 10: Límite de batería extracción y procesamiento.
Fuente: Elaboración propia.

La Figura 10 hace una primera distinción entre extracción minera a cielo abierto (rajo) y minería subterránea, luego distingue entre hidrometalurgia y pirometalurgia según el mineral que se esté tratando, y fundición y refinación nacional o extranjera. Esta última diferenciación se hace ya que, dependiendo de dónde se ubique, se debe considerar transporte marítimo y distintos factores de emisión debido a la matriz energética del país. Además, se incluye el proceso “Servicios”, que siguiendo la definición de Cochilco, corresponde a aquellas actividades que no se encuentran involucradas en los procesos productivos, pero que son necesarios para el desarrollo de la minería, como impulsión y desalación de agua, y consumo energético en talleres y campamentos (Cochilco, 2015a).

A continuación, se detallan y describen cada una de las etapas en función de la definición de Cochilco. Se usa esta definición ya que la principal fuente de información para el desarrollo de la herramienta corresponde a los reportes públicos de esta entidad. Además, se muestran tablas de cada proceso para poder identificar las fuentes de emisión e insumos de cada uno de estos y a qué alcance/s aportan.

- **Mina rajo:** considera todos los procesos unitarios para poder extraer el mineral y enviarlo a procesamiento. Esto implica: perforación, tronadura, carguío, transporte y chancado primario (Cochilco, 2015a). Las fuentes de emisión identificadas son:

Tabla 5: Fuentes de emisión mina rajo.

Fuentes de emisión	Alcance
Combustible	1 y 3
Energía eléctrica	2
Explosivos	1 y 3
Lubricantes	3
Neumáticos	3

Para entender de mejor manera por qué hay algunas fuentes de emisiones que tributan a más de un alcance, se ejemplifica con los explosivos. Los explosivos al ser detonados en la etapa de tronadura generan gases, entre ellos, CO₂ por lo que esas emisiones se consideran en el alcance 1. Además, los explosivos durante su producción adquieren una carga de emisiones por el hecho de ser producidos, y luego tienen que ser transportados hasta la operación, por lo que suma tanto en la categoría 1 como en la categoría 4 del alcance 3.

- **Mina subterránea:** considera todos los procesos unitarios para poder extraer el mineral y enviarlo a procesamiento por medio de minería subterránea. Esto implica: perforación, tronadura, carguío, transporte y chancado primario (Cochilco, 2015a). Las fuentes de emisión identificadas son:

Tabla 6: Fuentes de emisión mina subterránea.

Fuentes de emisión	Alcance
Combustible	1 y 3
Energía eléctrica	2
Explosivos	1 y 3
Lubricantes	3
Neumáticos	3

- **Concentradora:** posterior al chancado primario, es decir, chancado secundario y terciario (si se requiere), molienda, flotación, filtración (Cochilco, 2015a). Las fuentes de emisión identificadas son:

Tabla 7: Fuentes de emisión concentradora.

Fuentes de emisión	Alcance
Combustible	1 y 3
Energía eléctrica	2
Bolas de molienda	3
Cal	3
Colectores	3
Depresantes de pirita	3
Espumantes	3
Floculantes	3
Revestimientos de molinos	3

- **LX/SX/EW:** considera todas las operaciones unitarias hidrometalúrgicas, es decir, lixiviación, extracción por solvente, electrobtención (Cochilco, 2015a). Las fuentes de emisión identificadas son:

Tabla 8: Fuentes de emisión LX/SX/EW.

Fuentes de emisión	Alcance
Combustible	1 y 3
Energía eléctrica	2

Ácido sulfúrico	3
Extractantes	3

- **Fundición:** considera desde el concentrado de cobre a la producción de cobre blíster, esto implica las etapas de secado, fusión, conversión, refinado a fuego, y moldeo (Cochilco, 2015a). Las fuentes de emisión identificadas son:

Tabla 9: Fuentes de emisión fundición.

Fuentes de emisión	Alcance
Combustible	3
Energía eléctrica	3

A pesar de que el combustible y la energía eléctrica son parte del alcance 1 y 2 respectivamente, para el alcance de este trabajo fundición es parte del alcance 3 de la industria minera ya que se considera como parte de la categoría 10 procesamiento de productos comercializados.

- **Refinería:** electrólisis con la que se obtienen cátodos de cobre de alta pureza (Cochilco, 2015a). Las fuentes de emisión identificadas son:

Tabla 10: Fuentes de emisión refinería.

Fuentes de emisión	Alcance
Combustible	3
Energía eléctrica	3

A pesar de que el combustible y la energía eléctrica son parte del alcance 1 y 2 respectivamente, para el alcance de este trabajo refinación es parte del alcance 3 de la industria minera.

- **Servicios:** actividades que no participan en el proceso productivo de la cadena de valor principal, pero que son necesarios para el desarrollo de la minería. Esto contempla: talleres, campamentos, impulsión y desalación de agua (Cochilco, 2015a). Las fuentes de emisión identificadas son:

Tabla 11: Fuentes de emisión servicios.

Fuentes de emisión	Alcance
Combustible	1 y 3
Energía eléctrica	2

Es importante notar que los insumos que se indican como fuentes de emisión es producto del ciclo de vida de estos, el transporte marítimo cuando estos se importan, y el transporte terrestre para que lleguen directo a la operación tal como se ejemplifica con explosivos previamente.

4.2 SUPUESTOS

Para el desarrollo de la metodología de cálculo de emisiones, y entendiendo que existe un nivel de incertidumbre por la fuente de los datos, se requiere consideraciones para que la herramienta pueda ser lo más representativa posible sin añadir dificultad en la materialización de esta.

Para la cuantificación de emisiones de alcance 1 se considera el combustible utilizado teniendo en cuenta las etapas que establece Cochilco en sus reportes y que se detalla en la sección 4.1 LÍMITE DE BATERÍA. No se detalla los tipos de equipos para cada proceso.

Para la cuantificación de emisiones de alcance 2 se considera la energía eléctrica utilizada en las etapas que establece Cochilco en sus reportes y que se detalla en la sección 4.1 LÍMITE DE BATERÍA. Para este mismo alcance se utiliza el factor de emisión de la matriz energética del año 2019. No se detalla los tipos de equipos para cada proceso.

Con respecto al alcance 3 y el cálculo de las distancias marítimas asociadas al transporte tanto de bienes como de insumos, se toma como punto de origen y de llegada en Chile un puerto por región.

Para determinar las distancias terrestres recorridas se considera un puerto por región, siendo este el más importante en términos mineros, y luego, en base a información georreferenciada, se calculan las distancias que existen entre dichos puertos y las operaciones más grandes de cada región. Por lo tanto, la distancia terrestre recorrida para llegar a una operación desde el puerto corresponde al promedio simple de las distancias en cada una de las regiones.

Para determinar el origen de los insumos se utiliza como fuente principal de información el reporte de Cochilco “Análisis del mercado de insumos críticos en la minería del cobre”, para aquellos insumos que no aparecen en ese reporte se estudian los principales proveedores a nivel mundial. Las distancias de estos proveedores se calculan como la distancia promedio según la participación que tienen en la industria minera nacional.

Para calcular las distancias del transporte de cátodos se considera de la operación al puerto de salida y la distancia marítima del puerto de salida al puerto de destino. Se omiten las distancias desde el puerto a la industria manufacturera por la dificultad de trazar el cobre hasta esa etapa.

Para el transporte de concentrado se considera una ley de 28% y una humedad del 9% usando como referencia criterio experto, mientras que se tiene un 3% como pérdidas metalúrgicas en la fundición y un 1% en la refinería por el mismo criterio.

Al hacer la proyección de las emisiones en el periodo de estudio se mantiene la proporción de cátodos generados por hidrometalurgia y pirometalurgia para simplificar el cálculo. Sin embargo, se espera que esta proporción cambie en el tiempo producto del envejecimiento de las minas, lo que se traduce en disminución de la disponibilidad de óxidos y aumento en la extracción de sulfuros.

4.3 DESARROLLO HERRAMIENTA

Una vez que se toman todos los supuestos se detalla la información utilizada para el funcionamiento de la herramienta de cálculo de emisiones. Esta tiene como parámetros de entrada las siguientes variables:

- Ubicación de la faena: se encuentra parametrizada para ingresar de la I-VI región, además de la región metropolitana (RM) y la región de Arica y Parinacota (XV).
- Método de explotación: las opciones disponibles son minería a cielo abierto y minería subterránea de *block/panel caving*. Esto dada la caracterización de las operaciones mineras en Chile.
- Material movido: toneladas anuales extraídas.
- Material procesado: toneladas anuales procesadas.
- Días trabajados anuales: para determinar el transporte del personal de la operación.
- Procesamiento: si es que la operación trata minerales sulfurados u oxidados.
- Producción de cátodos: toneladas métricas finas de cobre anual en cátodos.
- Producción de concentrado: toneladas métricas finas de cobre anual en el concentrado.
- País de exportación principal de cátodos: se puede ingresar solo un país y define la distancia a transportar los productos.
- País de exportación principal de concentrado: se puede ingresar solo un país y define la distancia a transportar los productos.
- Número de trabajadores/as de la operación.
- Número de contratistas de la operación.
- Fundición y refinería: con las opciones de seleccionar que el concentrado se funde en instalaciones nacionales o internacionales.
- Razón estéril-mineral (REM).

Para definir las tasas de consumo se recurre a distintas fuentes de información. La principal es Cochilco con los reportes de insumos críticos y anuario de estadísticas, mientras que la fuente secundaria corresponde a benchmark, bibliografía y criterio experto con académicos/as. De esta forma se obtiene:

Tabla 12: Tasas de consumo por insumo.

Insumo	Tasa de consumo	Unidad	Fuente
Ácido sulfúrico	4.9	[t/t cátodo SXEW]	Cochilco
Bolas de molienda	700.0	[g acero/t procesada]	Cochilco
Cal	1.6	[kg/t procesada]	Cochilco
Colectores	55.0	[g/t procesada]	Bibliografía + criterio experto
Depresantes de pirita	150.0	[g/t procesada]	Bibliografía + criterio experto
Espumantes	20.0	[g t procesada]	Bibliografía + criterio experto
Explosivos	150.0	[g/t material]	Benchmark
Extractantes	2.0	[kg/t cátodo SXEW]	Cochilco
Floculantes	15.0	[g/t procesada]	Cochilco
Lubricantes	30.0	[ml/t material movido]	Bibliografía + criterio experto
Neumáticos	15.0	[g/t material movido]	Cochilco
Revestimientos de molinos	70.0	[g acero/t procesada]	Bibliografía + criterio experto

Dado que la herramienta se parametriza para que pueda ser utilizada con las características de una operación estándar y con el fin de estimar el total nacional, tiene sentido utilizar los datos promedio de tasas de consumo que se muestran en la Tabla 12: Tasas de consumo por insumo. Tabla 12, sin embargo, cuando se quiere conocer las emisiones específicas de una

operación minera, es necesario contar con la cantidad exacta de insumos utilizados para tener un valor con menor incertidumbre.

Para la energía utilizada en el cálculo de emisiones de alcance 1, 2 y 3 se utilizan los valores del 2019 entregados por Cochilco en su anuario de la industria minera:

Tabla 13: Tasas de consumo de energía Cochilco, 2020b.

Proceso	Combustible	Energía eléctrica	Unidad
Mina rajo	64.4	4.3	[MJ/t mineral extraído]
Mina subterránea	18.4	20.2	[MJ/t mineral extraído]
Concentradora	2.2	76.6	[MJ/t mineral procesado]
Fundición	1,417.6	1,469.3	[MJ/t concentrado procesado]
LX/SX/EW	8.8	37.8	[MJ/t mineral procesado]
Refinación	1,481.9	1,481.9	[MJ/t cátodo ER]
Servicios	1,685.7	1,685.7	[MJ/t cobre producido]

Para la implementación y funcionamiento de la herramienta de cálculo se decide utilizar Excel para una mayor gobernanza de los datos. La hoja principal corresponde a la creación de una base de datos en la que se encuentra toda la información necesaria para hacer los cálculos de las emisiones, tomando como insumo las tasas de consumo definidas en las Tabla 12 y Tabla 13, además de los factores de emisión, y distancias recorridas en el caso que aplique. Esta base de datos a su vez toma la información inicial de la operación para hacer los cálculos en función de las necesidades de quien utiliza la herramienta.

4.4 EXCLUSIÓN DE CATEGORÍAS

Como se mencionó, el GHG *Protocol* describe 15 categorías que permiten determinar las emisiones de alcance 3 de una compañía cualquiera. Esto significa que algunas de esas categorías no aplican necesariamente para una operación minera. Por lo mismo, a continuación, se detalla la justificación de la exclusión de estas en el trabajo teniendo en consideración el alcance de la tesis.

4.4.1 Categoría 2: Bienes capitales

En esta categoría deberían considerarse, por ejemplo, camiones de extracción, palas de carguío, perforadoras, infraestructura, planta concentradora, entre otros. La principal razón de su exclusión es que son bienes que se construyen una vez, previo al inicio de la operación de la mina, o equipos que no se adquieren de forma equitativa a lo largo del tiempo o de forma periódica. Esto significa que, si se cuantificaran las emisiones, no podrían compararse ni gestionarse de forma anual.

En una mina subterránea de *block/panel caving*, además de los equipos, debería considerarse la infraestructura necesaria para mantener la seguridad de la mina, como fortificación permanente de las galerías de los distintos niveles de trabajo. Una de las dificultades para la inclusión de la fortificación permanente tiene que ver con que los insumos son utilizados de forma intensiva en la fase de preparación de la mina y no en la fase de producción.

4.4.2 Categoría 5: Desechos generados en las operaciones

Esta categoría se descarta dado que GHG *Protocol* indica la cuantificación de esta solo en casos en que los desechos sean de un tercero. Los desechos directos de la operación que reporta deberían ser considerados en el alcance 1 y 2.

4.4.3 Categoría 6: Viajes de negocios

La incorporación de esta categoría se dificulta debido a la falta de parametrización dado que depende de factores particulares para cada operación. Adicionalmente, se estudia lo reportado públicamente por Collahuasi en los últimos 5 años en los reportes de huella de carbono corporativa, informes en los que evidencian que esta categoría corresponde, a menos del 0.05% (Collahuasi, 2020) lo que no influye significativamente en el total de las emisiones de alcance 3.

4.4.4 Categoría 8: Activos arrendados aguas arriba

Los activos arrendados aguas arriba no pueden ser parametrizados y son particulares para cada caso. Además, tendría más relevancia considerarlos a nivel compañía y no a nivel operación minera.

4.4.5 Categoría 11: Uso de productos comercializados

El uso final de los productos comercializados por las operaciones mineras corresponde a aquellos productos que utilizan como materia prima el cobre, es decir, teléfonos celulares, insumos médicos, automóviles, trenes, aviones, entre otros. Esto deja en evidencia la dificultad para hacer la trazabilidad de esos productos y cuantificar las emisiones relacionadas por su uso de forma anual.

4.4.6 Categoría 12: Disposición final de productos comercializados

Al igual que la categoría 11, la disposición final de los productos comercializados que se mencionan anteriormente presenta grandes complejidades para ser trazados y con ello cuantificarlos en un periodo de un año. De forma adicional, parametrizar estos en función de las características utilizadas en la interfaz no es posible.

4.4.7 Categoría 13: Bienes arrendados aguas abajo

Los activos arrendados aguas abajo no pueden ser parametrizados y son particulares para cada caso. Además, tendría más relevancia considerarlos a nivel compañía y no a nivel operación minera.

4.4.8 Categoría 14: Franquicias

Las franquicias no pueden ser parametrizadas y son particulares para cada caso. Además, tendría más relevancia considerarlos a nivel compañía y no a nivel operación minera.

4.4.9 Categoría 15: Inversiones

Las inversiones no pueden ser parametrizados y son particulares para cada caso. Además, tendría más relevancia considerarlos a nivel compañía y no a nivel operación minera.

4.5 EMISIONES INDUSTRIA DEL COBRE

Los resultados que se muestran a continuación provienen de la caracterización y ponderación de 5 tipos de mina, es decir, se tienen 5 grupos que intentan mostrar el comportamiento de la minería nacional chilena. El detalle considerado se encuentra en la sección Anexo A Caracterización grupos. En función de la información entregada por la herramienta de cálculo para cada grupo, se tienen las emisiones de alcance 1, 2 y 3 como sigue:

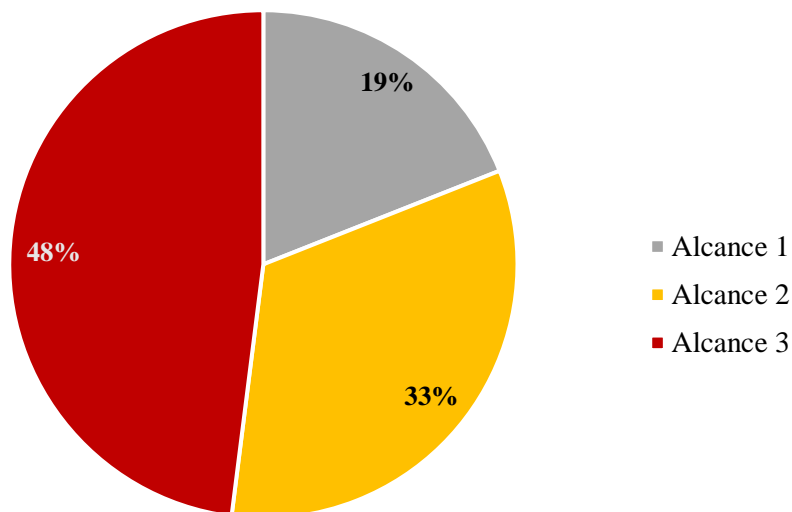


Figura 11: Distribución de emisiones a nivel nacional año 2019.

Se tiene un total de 28.2 millones de toneladas de CO₂e, en donde el 48% corresponde a emisiones de alcance 3, seguido por las emisiones de alcance 2 con un 33%, y finalmente las emisiones de alcance 1 con un 19% según se ve en la Figura 11.

Esto quiere decir que actualmente se identifican, cuantifican y reportan, al menos, el 52% de las emisiones de la industria minera en Chile, mientras que al menos el 48% se desconoce y genera gran incertidumbre al momento de hablar de descarbonización del sector en el largo plazo.

De forma adicional, se construye una tabla para visualizar tanto las emisiones totales, así como la intensidad de estas según el cobre fino producido el mismo año.

Tabla 14: Emisiones e intensidad de emisiones nacional 2019.

Emisiones	Emisiones [MtCO ₂ e]	Intensidad emisiones [tCO ₂ e/tmf Cu]
Alcance 1	5.35	0.92
Alcance 2	9.35	1.62
Alcance 3	13.53	2.34
Total	28.23	4.88

La intensidad de emisiones que se muestra en la Tabla 14 corresponde a la intensidad de emisiones ponderada considerando los 5 grupos que se construyen. Dicho esto, cuando se conocen los tres alcances, la intensidad de emisiones es de al menos 4.9 tCO₂e/tmf Cu-

A continuación, se desglosa cada uno de los alcances para identificar cuáles son los procesos o insumos críticos en la gestión de emisiones.

4.5.1 Alcance 1

Las emisiones directas o alcance 1 tienen la siguiente distribución:

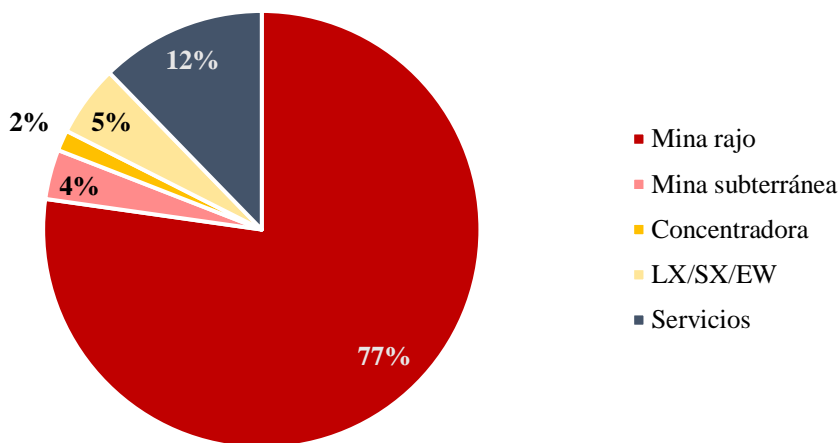


Figura 12: Distribución emisiones alcance 1 año 2019.

La Figura 12 muestra la distribución de las emisiones de alcance 1 y deja en evidencia que el mayor responsable es la Mina rajo con todas las operaciones unitarias que conlleva con un 77%, lo sigue Servicios con un 12% y el resto de los procesos tiene una participación menor al 5%.

Dado que mina rajo es responsable de gran parte de las emisiones directas, se hace un desglose de estas como se muestra en el gráfico a continuación.

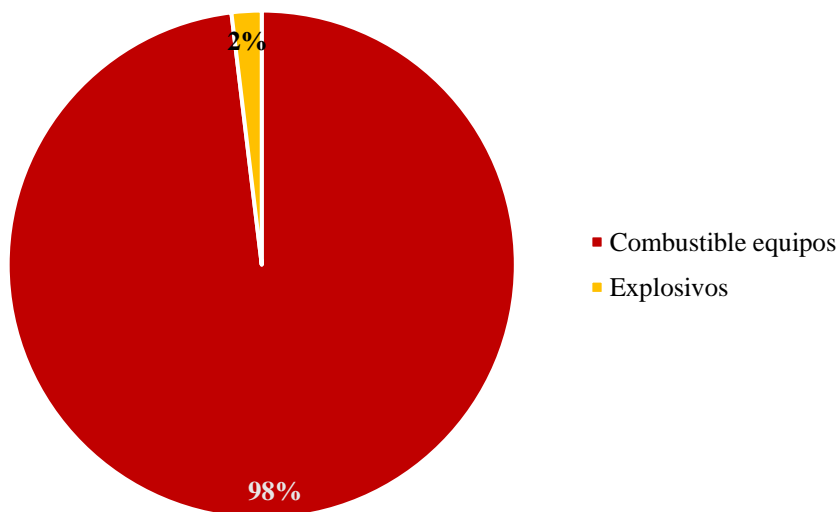


Figura 13: Distribución emisiones mina rajo año 2019.

Observando la Figura 13 se tiene que el 98% de las emisiones directas asociadas a rajo corresponde a la quema de combustibles por parte de los equipos, particularmente camiones de extracción. Mientras que solo el 2% restante están asociadas a las emisiones generadas por los explosivos utilizados en la tronadura. Esto significa que para la mitigación del alcance 1 es necesario enfocarse en la disminución del consumo de combustible de los equipos móviles. Además, al considerar el total de emisiones, es decir la suma del alcance 1, 2 y 3, el alcance 1 asociado al combustible de los equipos de la mina rajo son responsables de un 14% de las emisiones.

4.5.2 Alcance 2

Para el alcance 2 las emisiones se separan por proceso:

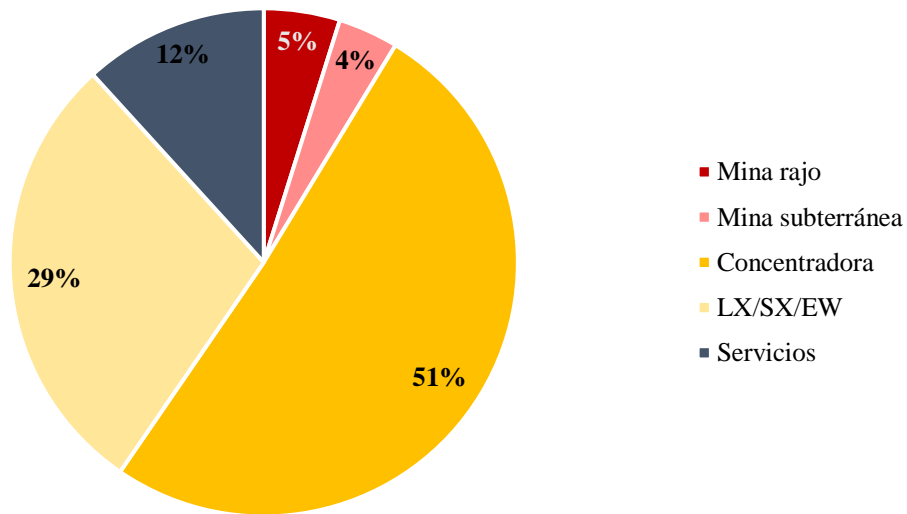


Figura 14: Distribución emisiones alcance 2 año 2019.

Para el alcance 2, y según muestra la Figura 14, el proceso al que se asocia la mayor cantidad de emisiones es la concentradora con un 51%, esto debido a la gran cantidad de energía que se requiere para reducir el tamaño de las partículas en la etapa de molienda. Lo sigue la metalurgia extractiva de los minerales oxidados, es decir, lixiviación, extracción por solvente y electro obtención con un 29% del total, en donde de estas tres, la última es la que requiere mayor cantidad de energía eléctrica. En tercer lugar, se encuentra Servicios con un 12%. Recordando que esta categoría contempla la desalación e impulsión de agua, y que la escasez hídrica es inminente, este proceso debería aumentar en el mediano y largo plazo.

Cuando se conocen las emisiones totales de la industria, tanto directas como indirectas (2 y 3), las emisiones de alcance 2 asociadas al proceso de concentración equivalen al 16.7% del total. Por lo anterior, no solo se requieren operaciones más eficientes en términos energéticos, sino que también energías renovables que permitan limpiar la matriz energética, y equipos y/o tecnologías que habiliten procesos más eficientes, como es el caso de la conminución.

Finalmente, tanto mina rajo como subterránea tiene una participación igual o menor al 5%. Si bien minería subterránea tiene un consumo mayor de electricidad debido a la operación de ventilación, este método de explotación corresponde solo al 12% de la producción nacional,

mientras que el otro 88% es de minería a cielo abierto (Consejo Minero, 2021a) que tiene un bajo consumo de energía eléctrica.

4.5.3 Alcance 3

Las emisiones de alcance 3 corresponden a 13.8 MtCO_{2e} y según categoría se dividen en:

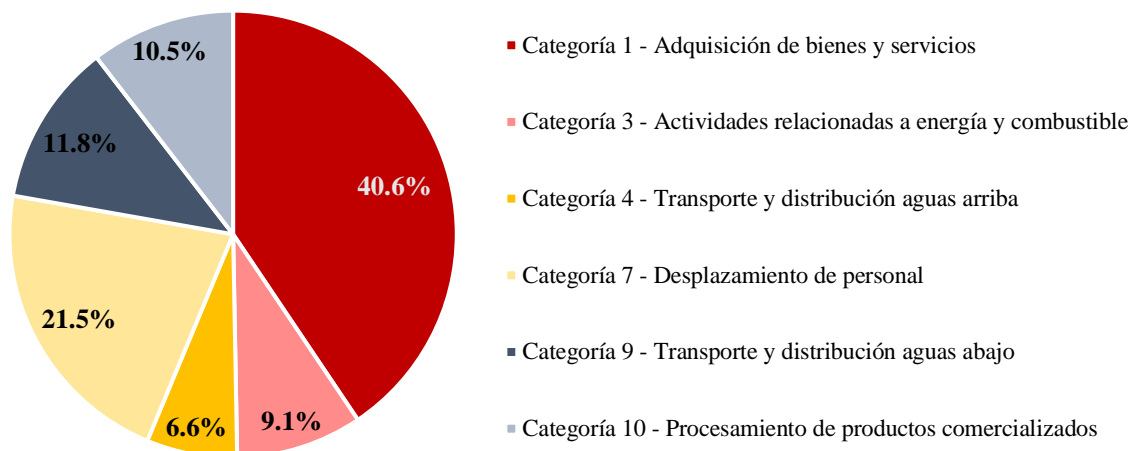


Figura 15: Distribución emisiones alcance 3 año 2019.

Según la Figura 15 la Categoría 1: Adquisición de bienes y servicios es responsable del 41% de las emisiones de alcance 3, lo que indica que es importante identificar el origen de los insumos de tal forma de tener una cadena de suministros lo más responsable posible en términos de emisiones. En esta categoría uno de los parámetros clave para la cuantificación corresponde al factor de emisión de cada uno de los insumos identificados, los que entregan un dato sobre las emisiones de alcance 1 y 2 generados en la producción de estos, lo que quiere decir que cuando los insumos utilizados vienen de países con normativas ambientales más laxas estos tienen una carga asociada mucho mayor.

Luego de la Categoría 1 lo sigue la Categoría 7: Desplazamiento de trabajadores, con un 21.5% de las emisiones del alcance 3. Como esto considera tanto transporte terrestre como aéreo, es importante la procedencia de las y los trabajadores de las operaciones, dado que mientras mayor cantidad de personas provenientes de una región externa a esta, mayores son las emisiones asociadas al transporte aéreo. Las emisiones de esta categoría además se distribuyen de la siguiente forma:

Tabla 15: Distribución emisiones Categoría 7 desplazamiento de trabajadoras-es.

Transporte personal	Emisiones [tCO _{2e}]	Participación Categoría 7
Aéreo	990,160	34%
Terrestre	1,918,472	66%

Se ve de la Tabla 15 que el transporte terrestre del personal es lo que tiene una mayor ponderación en el total con un 66% de participación en la categoría, por lo que se propone como

iniciativa para la gestión de estas emisiones la incorporación de electromovilidad en los buses encargados de transportar a las y los trabajadores hacia las operaciones.

Siguiendo con la Figura 15, la Categoría 9: Transporte y distribución aguas abajo ocupa el tercer lugar con un 11.8% de las emisiones de alcance 3. Aquí entra el transporte de los productos comercializados por la industria, es decir, cátodos y concentrados. Como el 60% de la producción total nacional se exporta como concentrado (Cochilco, 2020b), y este producto contiene cerca de un 70% de material no económico, gran parte de estas emisiones se destinan a transportar material descartable en los siguientes procesos o sin interés económico. Adicionalmente, se entrega la información de intensidad de emisiones generadas por el transporte de concentrado y cátodos a China, que es el principal país de exportación de ambos productos, en la siguiente tabla:

Tabla 16: Intensidad de emisiones transporte marítimo de productos.

Producto	Emisiones [tCO₂e]	Intensidad emisiones [kgCO₂e/tmf Cu]
Cátodo	171,388.1	68.6
Concentrado	877,698.3	266.9

De la Tabla 16 se ve la gran diferencia que existe no solo en la generación de emisiones por el transporte marítimo de ambos productos comercializables, sino también en la intensidad de emisiones. Por un lado, se tiene que el concentrado generado en Chile al ser transportado vía marítima emite 5 veces más emisiones que los cátodos que se generan en el país y son enviados a China para ser utilizados en la industria manufacturera. Por otro lado, se tiene que la intensidad de emisiones, es decir, la cantidad de CO₂e generada por el transporte marítimo de un kilo de cobre fino, es de 68.6 kg para los cátodos, y casi 4 veces mayor para el concentrado, llegando a 266.9 kg.

El 10.5% de las emisiones de alcance 3 que se muestra en la Figura 15 corresponden a la categoría 10: Procesamiento de productos comercializados. Aquí se considera el procesamiento de concentrados para generar cátodos de cobre en fundiciones y refinerías nacionales e internacionales. Del total de esta categoría, el 89% corresponde a las emisiones generadas por FURE en China, mientras que el 11% restante están asociadas a FURE en Chile. Dado que la fundición se considera externa a la operación minera, en esta categoría solo se considera alcance 1 y 2 de FURE, esto indica, además, que es importante la eficiencia de las operaciones, las tecnologías de estas, y la matriz energética del país en el que se encuentran. Se muestra a continuación la intensidad de emisiones en la generación de cátodos en Chile versus China.

Tabla 17: Intensidad de emisiones FURE.

FURE	Emisiones [tCO₂e]	Intensidad emisiones [kgCO₂e/tmf Cu]
Chile	178,457	344
China	1,236,671	376

En la Tabla previa se nota una diferencia sustancial en las emisiones generadas en la fundición y refinería entre Chile y China, principalmente por la cantidad de concentrado que se trata en ambos países. Sin embargo, cuando se cuantifica la intensidad de emisiones, se ve una diferencia solo de 32 kgCO₂e, siendo mayor la de China con 376 kgCO₂e/tmf Cu. Esto se justifica principalmente en el factor de emisión de la matriz energética en China, que es un 50% mayor

con respecto al de Chile. Si Chile lleva a cabo sus planes de descarbonización de la matriz y se mantienen las proporciones de exportación, el parámetro de intensidad de emisiones debería disminuir aún más para el caso de Chile.

Para el estudio se utiliza China como único país de exportación con el fin de simplificar los cálculos, sin embargo, si se tienen en cuenta otros países relevantes en FURE el factor principal de comparación corresponde al factor de emisión de la matriz energética de cada país. En el siguiente gráfico se muestran alguno de ellos:

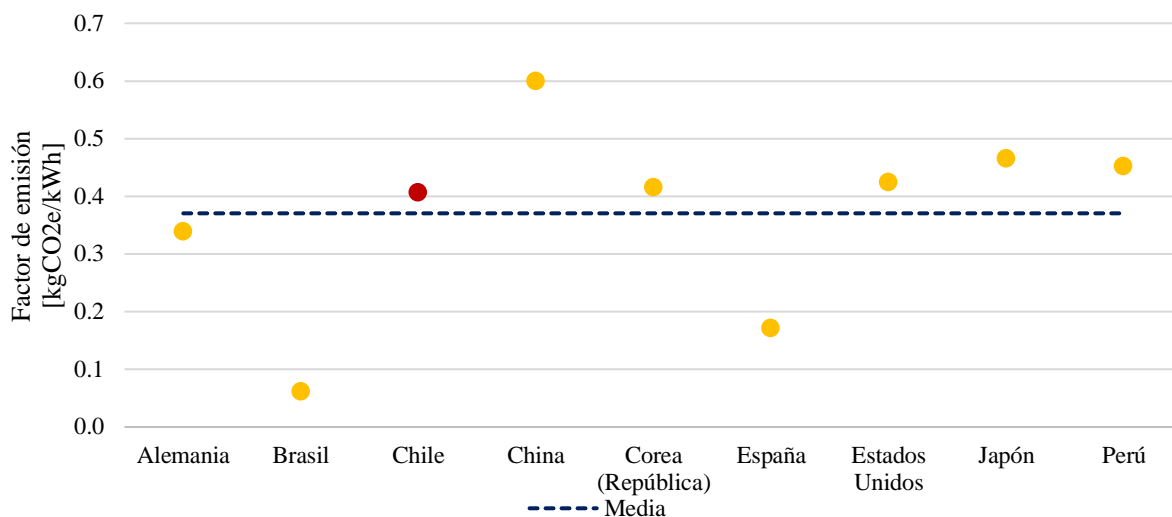


Figura 16: Factor de emisión por país.

De los distintos factores de emisión que se muestran en la Figura 16, el más alto corresponde al de China, mientras que el FE de Chile se encuentra cercano a la media de los países estudiados. Esto significa que, para disminuir las emisiones en términos globales, solo conviene enviar los concentrados a países con un FE menor al de Chile y que implique una distancia de transporte menor que a China. Esto siempre y cuando las tecnologías utilizadas sean iguales y tengan una eficiencia similar. Puesto que con mejores tecnologías de fundición, esta situación podría equilibrarse. El detalle de los factores de emisión se encuentra en el Anexo C Factores de emisión.

Tanto la Categoría 3: Actividades relacionadas a energía y combustible, como la Categoría 4: Transporte y distribución aguas arriba son responsables de menos del 10% cada una en la Figura 16. Sin embargo, la generación de capacidades locales se propone como una buena iniciativa para disminuir esta categoría, ya que, al reducir las distancias a recorrer hasta la operación, se reducen de forma directa estas emisiones.

Cuando se tiene el total de las emisiones -alcances 1, 2 y 3- la participación en el total de las categorías de alcance 3 mencionadas tiene la siguiente distribución:

Tabla 18: Distribución emisiones de alcance 3 en el total.

Categoría	Participación en alcance 3	Participación en el total de emisiones

1 Adquisición de bienes y servicios	40.6%	19.4%
3 Actividades relacionadas a energía y combustible	9.1%	4.4%
4 Transporte y distribución aguas arriba	6.6%	3.1%
7 Desplazamiento de personal	21.5%	10.3%
9 Transporte y distribución aguas abajo	11.8%	5.6%
10 Procesamiento de productos comercializados	10.5%	5.0%

En la Tabla 18 se puede ver más claramente la preponderancia que tienen las categorías 1 y 7. La primera, adquisición de bienes con el 19.4% del total de emisiones y la segunda desplazamiento de personal con el 10.3%. Reafirmando la importancia de tener distintas iniciativas que puedan mejorar estos indicadores en la industria minera nacional.

Otra clasificación de las emisiones de alcance 3 es según el origen de estas, es decir, si fueron en la producción de los insumos, en el transporte de estos, en el transporte de productos, FURE o transporte de trabajadores.

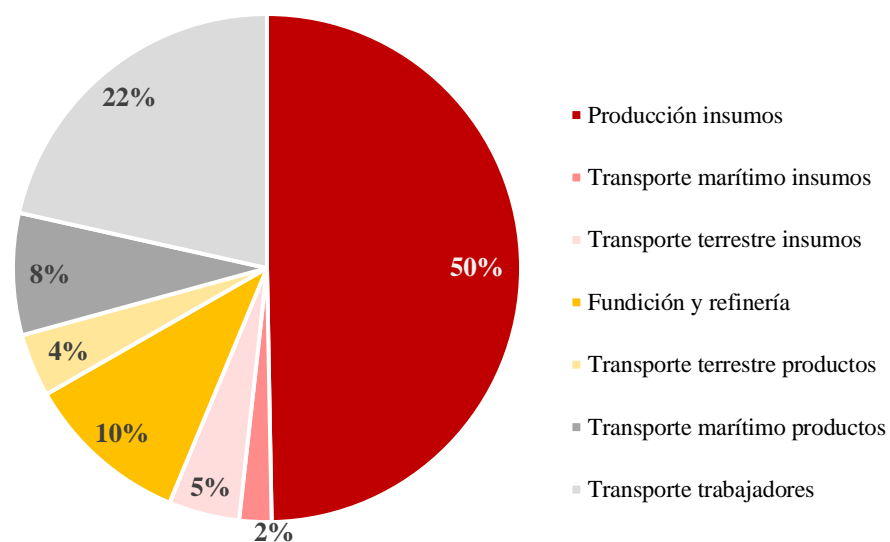


Figura 17: Distribución de emisiones alcance 3 según origen.

El mayor responsable de emisiones de alcance 3 según la Figura 17 es la producción de los insumos con un 50%, ya sean estos proveedores internacionales o nacionales. Lo sigue el transporte terrestre y aéreo de las y los trabajadores de las operaciones mineras con un 22%, luego las emisiones de alcance 1 y 2 generadas en el procesamiento de concentrados con un 10% (FURE), y el transporte marítimo de los productos comercializables, es decir, concentrados y cátodos con un 8%. Tanto el transporte marítimo y terrestre de los insumos, como el transporte terrestre de los productos tienen una participación menor o igual al 5%.

Si solo se toman en cuenta los insumos utilizados por la industria, que suman 7.6 MtCO₂e, considerando tanto producción como su transporte, las emisiones se distribuyen como:

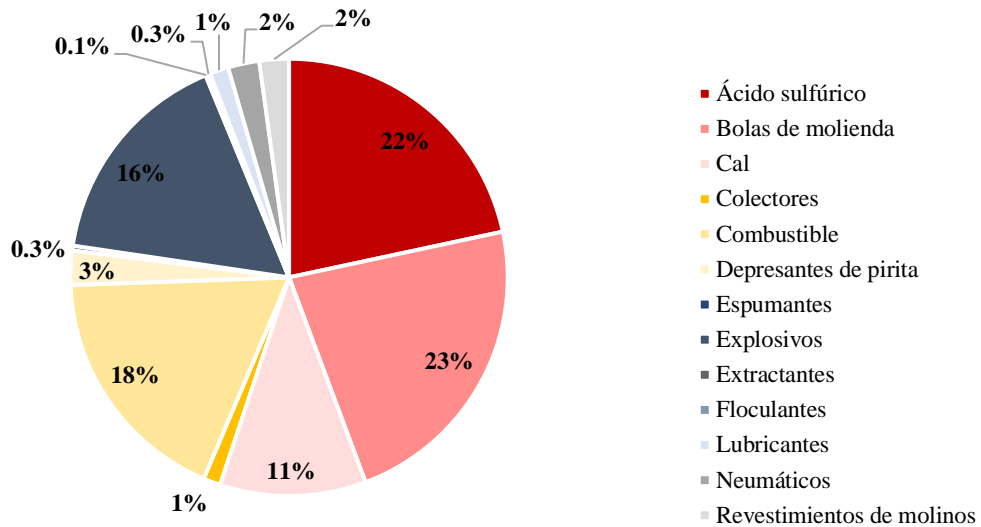


Figura 18: Distribución emisiones de insumos alcance 3.

Con la Figura 18 se pueden identificar 5 insumos que corresponde al 90% de las emisiones, ordenados de forma decreciente se tiene bolas de molienda con un 23%, ácido sulfúrico con un 22%, combustible con un 18%, explosivos con un 16% y Cal con un 11%. Dichos insumos pueden ser definidos como insumos críticos en términos de emisiones de alcance 3 y la industria debería tener especial cuidado en la gestión en su cadena de suministros. El resto de los insumos tienen una participación menor al 3%.

Para complementar la información de la Figura 18 en la sección Anexo B Distribución emisiones insumos se muestra una tabla con el detalle de los valores, además en el gráfico siguiente se desglosan los mismos insumos ordenados según su participación:

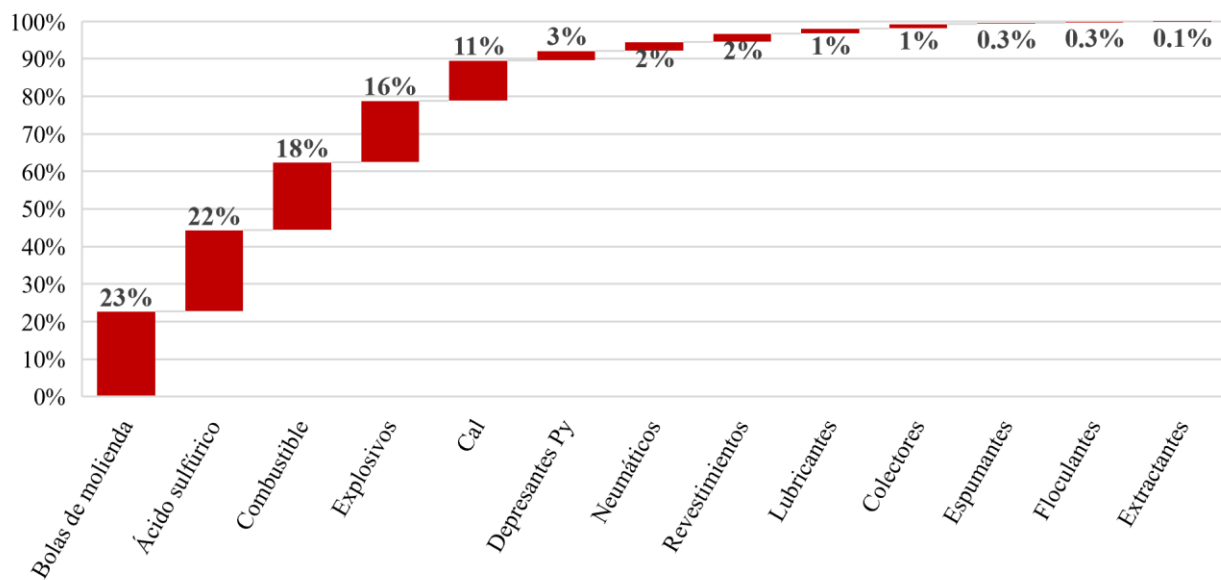


Figura 19: Desglose participación de emisiones de insumos.

De la Figura 19 se puede distinguir de mejor manera la composición de las emisiones generadas por el requerimiento de insumos, particularmente aquellos que se definieron anteriormente como insumos críticos con respecto a las emisiones de alcance 3.

La industria minera nacional debería enfocarse en la gestión de estos insumos críticos, teniendo en cuenta que cada operación es particular y que podrían existir diferencias en estos valores según proveedores específicos, origen de estos, cantidad utilizada de cada insumo y ubicación de la faena de tal forma de identificar el 80/20 de cada operación.

Adicionalmente, y considerando las emisiones totales, es decir, alcance 1, 2 y 3. Se tiene la siguiente distribución:

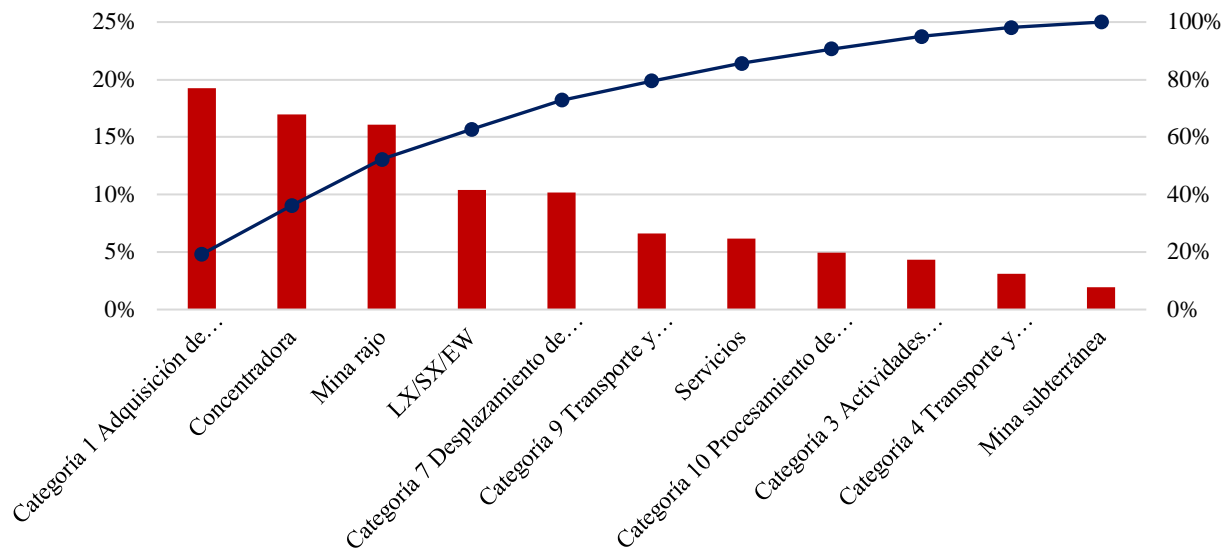


Figura 20: Distribución emisiones totales.

Con esta Figura, se puede ver que las emisiones generadas provenientes de la categoría 1: adquisición de bienes y servicios es responsable del 19.4%, seguido por las emisiones de alcance 1 y 2 de la concentradora con un 17.2%, y por las emisiones de la mina rajo con un 16.2%. Estas 3 categorías/procesos son responsables del 52.8% de las emisiones totales. El conjunto de los procesos de metalurgia extractiva de óxidos corresponde a un 10.5%, el desplazamiento de personal 10.3% del total y el transporte de productos como cátodos y concentrados el 5.6%. En su totalidad, estos 6 procesos/categorías son responsables del 80% de las emisiones de la industria minera nacional.

Esto indica que las tecnologías e iniciativas impulsadas deberían estar enfocadas en: i) el desarrollo de proveedores locales o regionales que tengan una producción responsable, ii) mejor tecnología y mayor innovación en los procesos de molienda, iii) menor dependencia de combustibles fósiles en los equipos de transporte de mineral, iv) tecnologías eficientes energéticamente en los procesos de hidrometalurgia, v) incorporación de buses eléctricos en el transporte de personal, así como minimización de viajes aéreos de trabajadores, y vi) menor dependencia de combustibles fósiles en equipos de transporte marítimo así como mayor agregación de valor en los productos finales comercializados.

4.6 PROYECCIÓN DE EMISIONES

Para poder entender cómo deberían estar enfocadas las políticas públicas con el fin de reducir las emisiones de la industria es necesario conocer el comportamiento de estas en el largo plazo, información que se cuantifica y analiza en las subsecciones siguientes.

4.6.1 Proyección con disminución de leyes

Considerando los mismos grupos de estudio anteriores, la disminución de las leyes como se muestra en el Anexo D Proyección ley de cobre largo plazo, el aumento de la producción esperado que se establece en la Política Nacional Minera 2050 (Ministerio de Minería, 2021), y manteniendo las proporciones de cobre obtenido por pirometalurgia e hidrometalurgia, se obtiene el escenario *Business as Usual* (BaU), y los datos se muestra como sigue:

Tabla 19: Proyección de emisiones escenario BaU.

	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Producción Cu [Mtmf]	5.9	6.8	7.0	7.5	8.0	8.5	8.9
Alcance 1 [MtCO ₂ e]	5.3	6.6	7.6	8.8	10.4	12.1	14.2
Alcance 2 [MtCO ₂ e]	9.4	11.4	13.1	15.1	17.6	20.4	23.7
Alcance 3 [MtCO ₂ e]	14.5	17.0	18.3	20.5	22.9	25.4	28.4
Total [MtCO₂e]	28.2	35.0	39.0	44.4	50.9	57.9	66.3

De la Tabla 19, por un lado, se ve que la producción el 2020 es de 5.9 Mt de cobre, mientras que al 2050 se esperan 8.9 Mt, lo que representa un aumento del 52%. Por otro lado, las emisiones totales aumentan de 28.2 MtCO₂e el 2020 a 66.3 MtCO₂e, lo que equivale a un aumento del 135%. La no linealidad del aumento de las emisiones se justifica con que los grupos de operaciones mineras no aumentan sus emisiones de forma lineal y que estos grupos tienen aportes distintos al total. Es importante considerar que se espera que la proporción de cobre obtenido mediante hidrometalurgia disminuya mientras que la de pirometalurgia aumente, por lo que esta proyección de emisiones podría ser aún mayor, ya que la cantidad de emisiones por tonelada de cobre fino para este tipo de procesamiento es mucho mayor.

Los datos de la Tabla 19 se complementan con el siguiente gráfico:

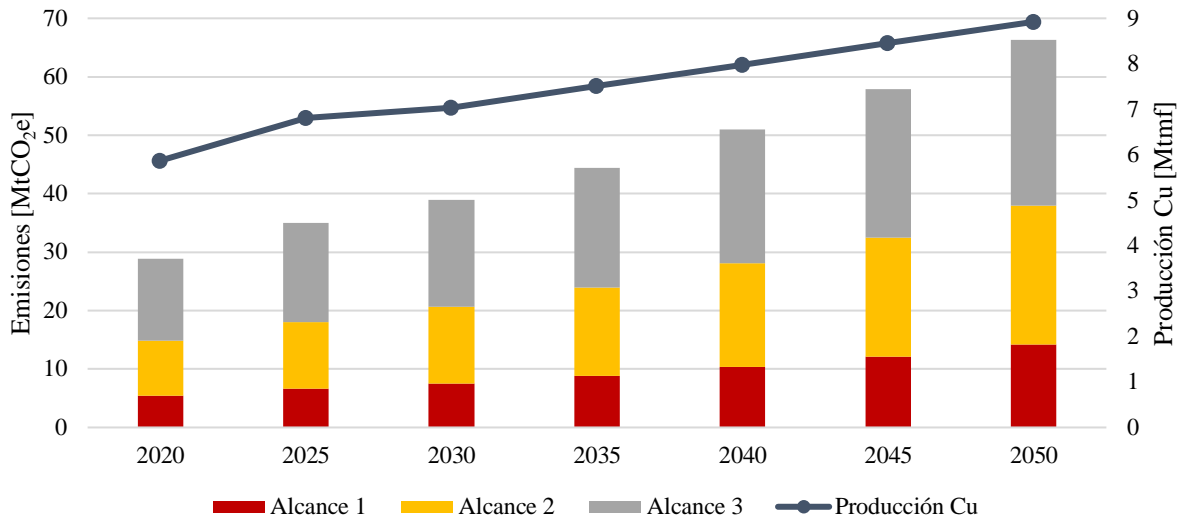


Figura 21: Proyección de emisiones caso BaU.

En la Figura 21 se ve el comportamiento de las emisiones que se explica con los datos de la Tabla 19, en donde la producción aumenta casi de forma lineal, mientras que las emisiones aumentan de forma exponencial.

En el mismo gráfico, se muestra también la proporción de los alcances y cómo estos van evolucionando. En el caso del alcance 1, este aumenta de las 5.3 MtCO₂e el 2020 a 14.2 MtCO₂e el 2050, lo que representa un aumento del 168%, mientras que el alcance 2 aumenta de 9.4 MtCO₂e el 2020 a 23.7 MtCO₂e que es un aumento del 150%, y el alcance 3 aumenta de 14.5 MtCO₂e el 2020 a 28.4 MtCO₂e el 2050, creciendo un 103%.

La proporción de los alcances en las emisiones totales se observa mejor en el siguiente gráfico:

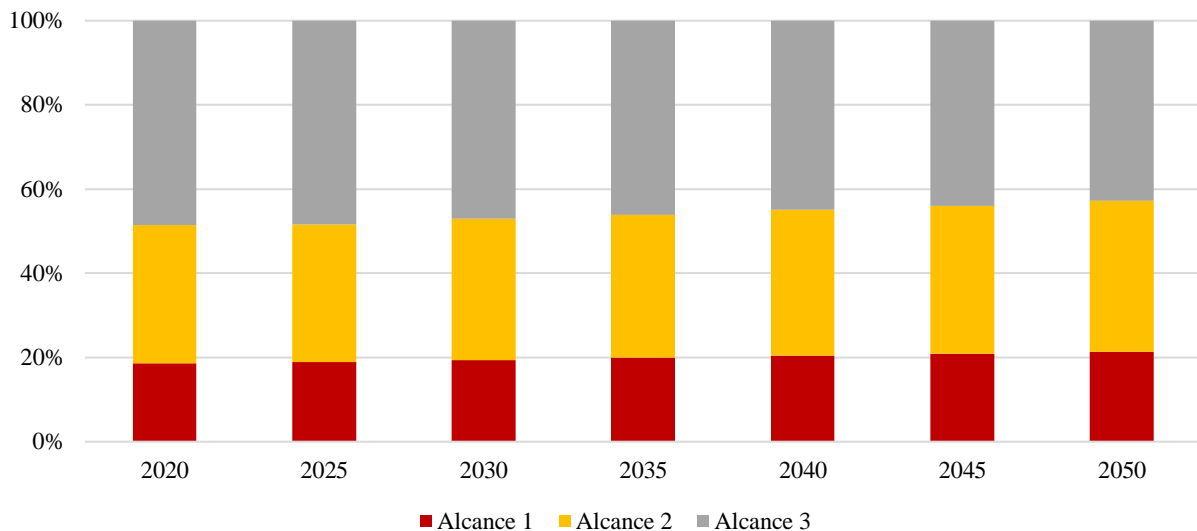


Figura 22: Proporción de los alcances en el total de emisiones.

Como se detalla en la sección 4.5 EMISIONES INDUSTRIA DEL COBRE, las emisiones de alcance 1 corresponden al 19%, las de alcance 2 al 33% y las de alcance 3 un 48% el año 2019. En la Figura 22 se observa que las emisiones el 2020 tienen las mismas proporciones, y a medida que se avanza en el tiempo, las emisiones de alcance 1 aumentan su proporción a 21% el 2050, mientras que las de alcance 2 aumentan a un 36%, y las de alcance 3 disminuyen a un 43%. Esto se justifica con que para esta proyección solo se considera la disminución de las leyes, lo que se traduce en un aumento del material a extraer y a tratar para poder obtener la misma cantidad de cobre, y a su vez, un aumento en la demanda de combustible para el transporte del material y aumento de la energía eléctrica utilizada en los procesos.

Otro indicador para considerar en el análisis de emisiones corresponde a la intensidad de estas en función de la producción nacional de cobre como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 20: Proyección intensidad de emisiones.

Parámetro	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Alcance 1 [tCO ₂ e/tmf Cu]	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.6
Alcance 2 [tCO ₂ e/tmf Cu]	1.6	1.7	1.9	2.0	2.2	2.4	2.7
Alcance 3 [tCO ₂ e/tmf Cu]	2.4	2.5	2.6	2.7	2.9	3.0	3.2
Total [tCO₂e/tmf Cu]	4.9	5.1	5.5	5.9	6.4	6.9	7.4

La Tabla 20 indica que al 2020 la producción de una tonelada de cobre fino genera 4.9 toneladas de emisiones de CO₂e y estas van creciendo hasta llegar a la generación de 7.4 tCO₂e al 2050, evento que se traduce en un crecimiento del 51%. De los 3 alcances, el que tiene una mayor ponderación en el total corresponde a las emisiones de alcance 3 en el total del periodo como se muestra en el siguiente gráfico.

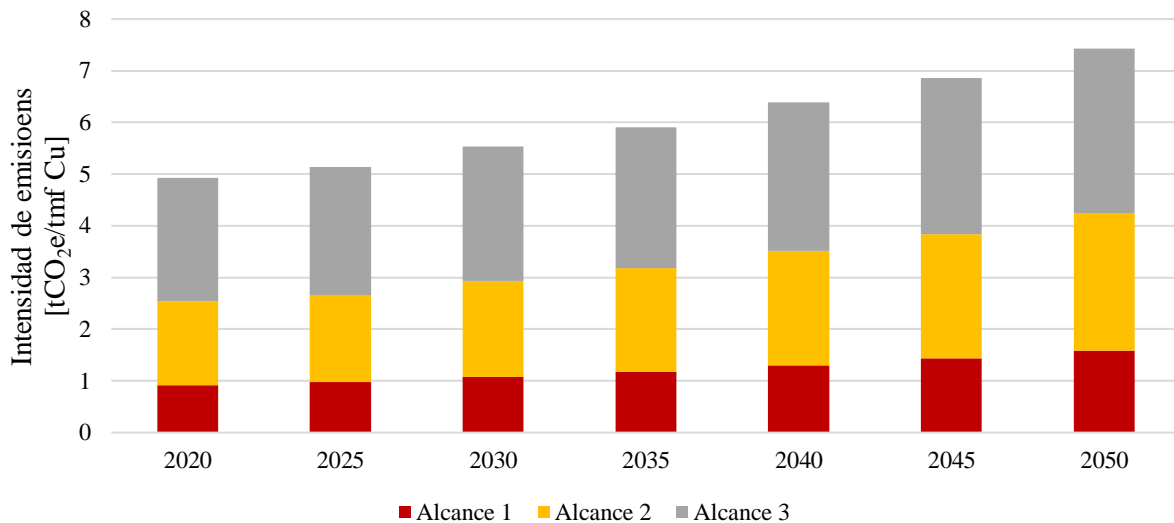


Figura 23: Proyección intensidad de emisiones.

Los valores presentados en la Figura 23 se relacionan de forma directa con el comportamiento de las emisiones que se muestran en la Figura 22 en esta misma sección. Con las mismas proporciones de cada uno de los alcances, y evidenciando que el alcance 3 tiene una mayor ponderación.

Para finalizar el análisis de este escenario, y complementando la información relacionada a intensidad de emisiones, se muestra la descomposición de la Figura 23 por cada uno de los alcances en el periodo estudiado.

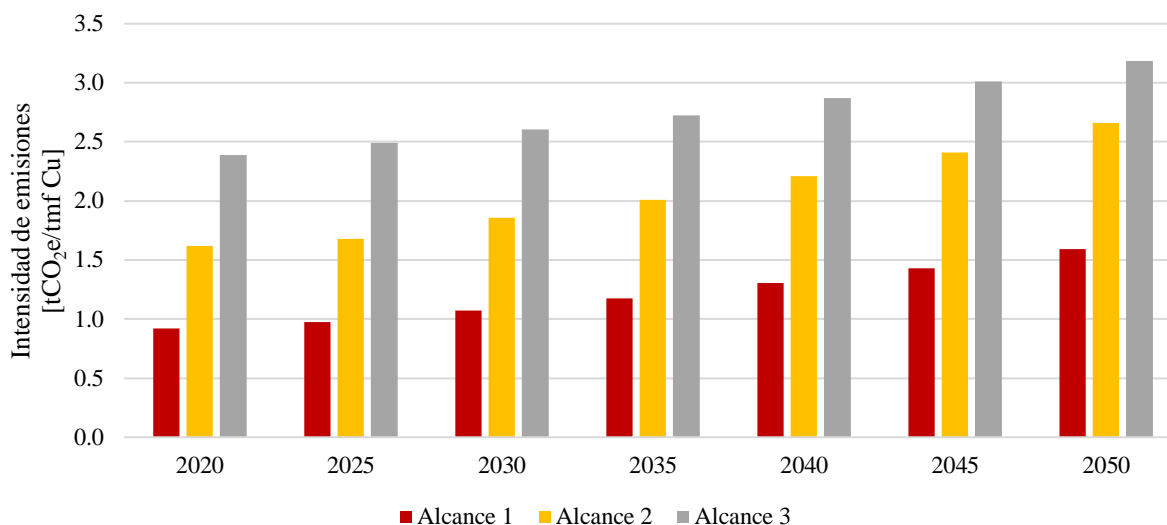


Figura 24: Intensidad de emisiones por alcance en cada año.

Al igual que en los elementos anteriores, en la Figura 24 se ve que, en todo el periodo, el alcance 1 es el que tiene un menor aporte a la intensidad total, mientras que el mayor aporte lo tiene el alcance 3.

4.6.2 Proyección con cambio en la matriz energética

Como hay intenciones concretas de descarbonizar la matriz energética al 2050 en el país (Ministerio de Energía, 2020b) y como se ve en la sección Anexo E Proyección generación eléctrica en Chile, el factor de emisión de la matriz debería disminuir, lo que significa que, a pesar del aumento en la demanda de energía eléctrica por parte de la industria minera, las emisiones de alcance 2 deberían decrecer de forma natural por este cambio. Con esto en consideración, y teniendo en cuenta la disminución de las leyes, las emisiones deberían comportarse como sigue.

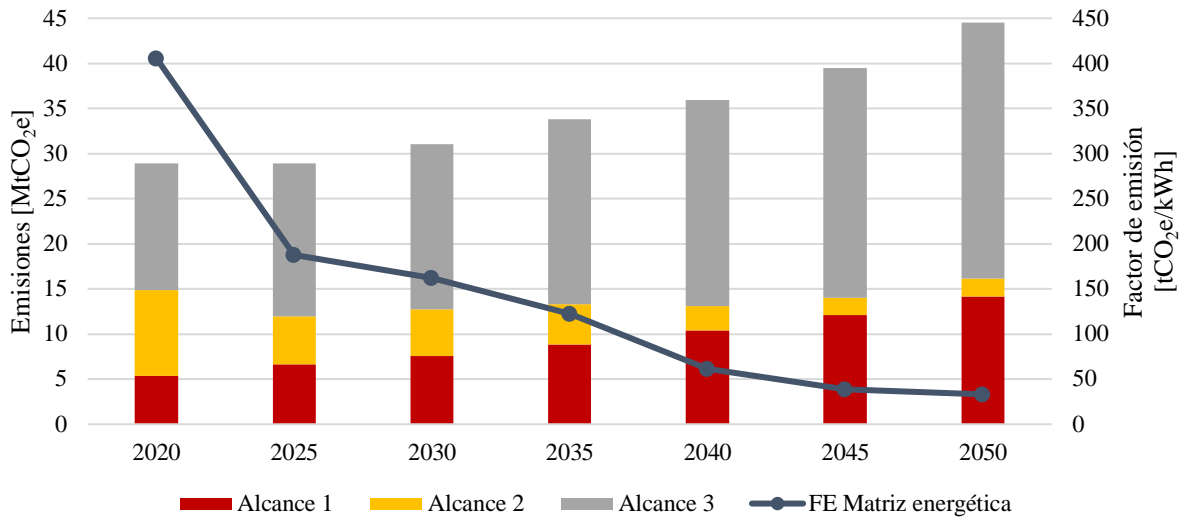


Figura 25: Proyección de emisiones con cambio en la matriz energética.

Como se menciona anteriormente, la Figura 25 muestra cómo las emisiones de alcance 2 disminuyen en el tiempo a pesar del aumento de la demanda, generando además una disminución en las emisiones globales. Esta disminución se relaciona de forma directa con el decrecimiento del factor de emisión producto de la incorporación de energías renovables en la matriz energética.

Lo anterior también implica un cambio en las proporciones de cada uno de los alcances, que se muestran de forma previa en la Figura 25, como se evidencia en el siguiente gráfico:

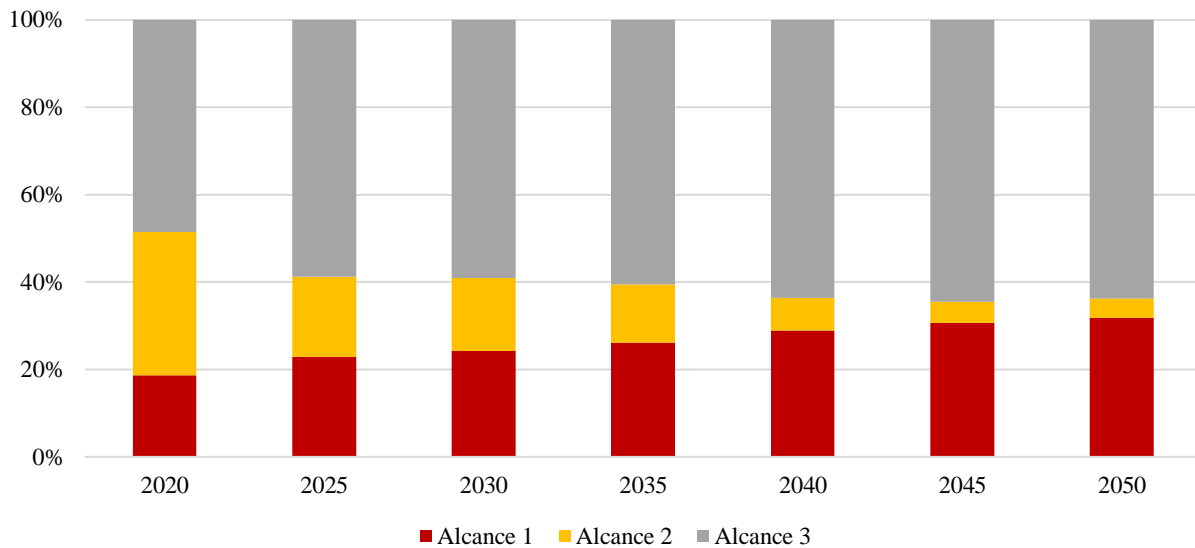


Figura 26: Proporciones de los alcances con cambio en la matriz energética.

Lo más notorio que se observa de la Figura 26 es la disminución de la participación del alcance 2 de un 33% al 2020 a un 4% al 2050. Mientras que el alcance 1 aumenta su participación de un 19% a un 32% y el alcance 3 de un 48% a un 64% en el mismo periodo.

Se muestra, además, un gráfico del comportamiento de las emisiones de alcance 2 con el factor de emisión para ver su relación:

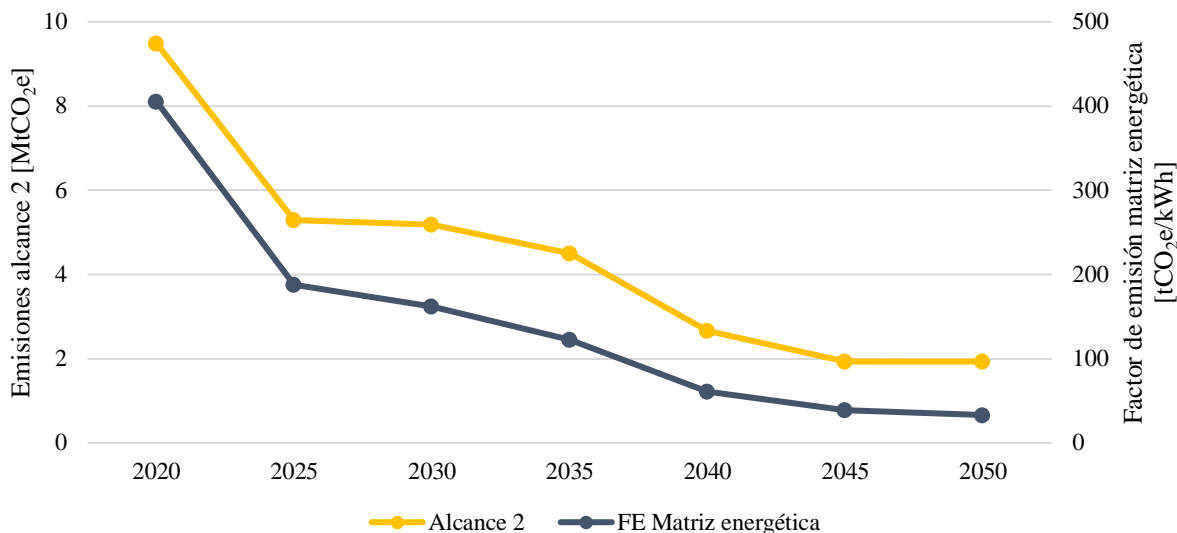


Figura 27: Proyección emisiones de alcance 2 con cambio en la matriz.

Se ve claramente en la Figura 27 que la descarbonización de la matriz energética, y con ello la disminución en el factor de emisión, impacta de forma directa las emisiones, evidenciando una dependencia importante de la reducción de emisiones en la industria minera. Dicho esto, cambios en la velocidad de la transición energética esperada tiene un fuerte impacto en las emisiones de alcance 2 del sector minero.

Al igual que en el caso anterior, se muestran los datos de intensidad de emisiones:

Tabla 21: Datos proyección intensidad de emisiones con cambio en la matriz energética.

Parámetro	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Alcance 1 [tCO ₂ e/tmf Cu]	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.6
Alcance 2 [tCO ₂ e/tmf Cu]	1.6	0.8	0.7	0.6	0.3	0.2	0.2
Alcance 3 [tCO ₂ e/tmf Cu]	2.4	2.5	2.6	2.7	2.9	3.0	3.2
Total [tCO₂e/tmf Cu]	4.9	4.2	4.4	4.5	4.5	4.7	5.0

Como se ve en la Tabla 21 y a diferencia del caso anterior, se observa un cambio considerable en la intensidad de emisiones de alcance 2 y total, disminuyendo de 1.6 tCO₂e/tmf Cu el 2020 a 0.2 tCO₂e/tmf Cu al 2050. Además, tanto el año 2020 como 2050 se tiene una intensidad de emisiones similar, cercana a 5 tCO₂e/tmf Cu, lo que indica que, a pesar del aumento en la producción de cobre fino y la demanda de recursos, la generación de emisiones se mantiene casi constante. Para complementar esta información, se genera el siguiente gráfico:

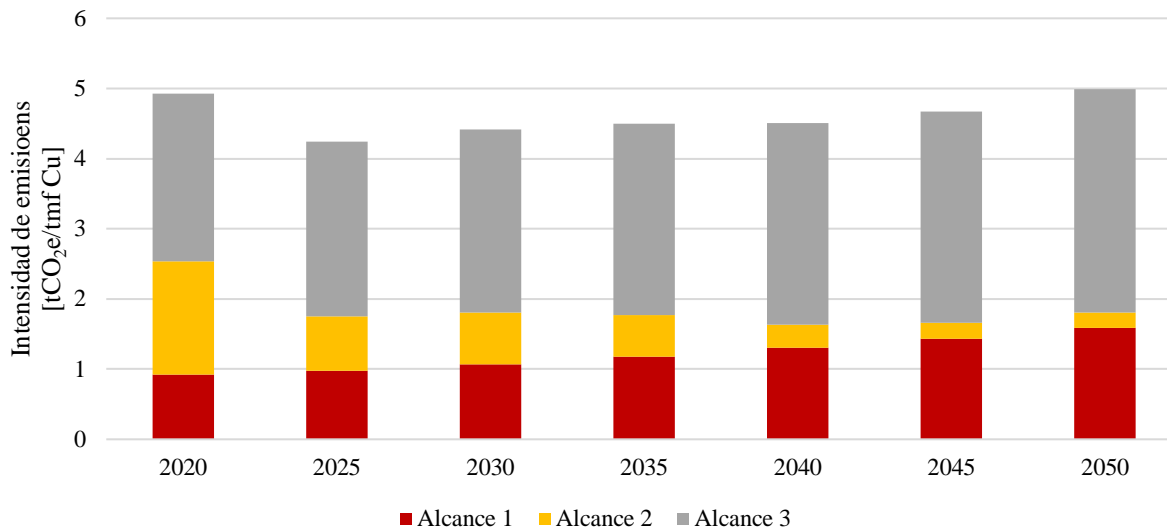


Figura 28: Proyección de intensidad de emisiones con cambio en la matriz energética.

Queda en evidencia con la Figura 28 que con la disminución de las emisiones de alcance 2 producto del cambio en la matriz energética la intensidad total de emisiones en el periodo 2020-2050 se mantiene casi constante, alcanzando un mínimo de 4.6 tCO₂e/tmf Cu el 2025 y un máximo de 5.0 tCO₂e/tmf Cu el año 2050.

Para finalizar el análisis de este escenario, se muestra el desglose de los alcances en el total de la intensidad de emisiones.

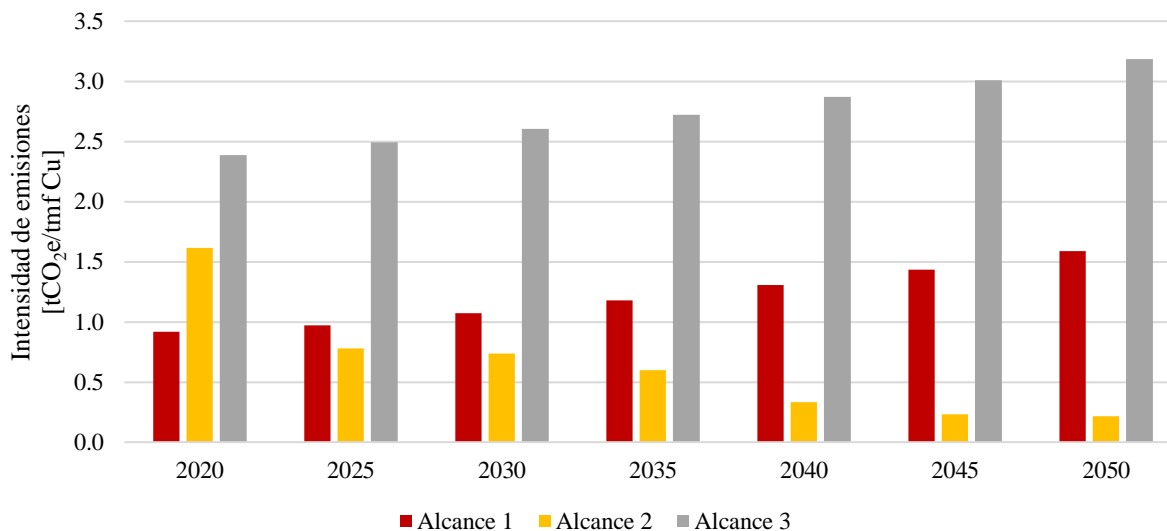


Figura 29: Intensidad de emisiones por alcance caso cambio en la matriz.

Con la Figura 29 se puede complementar el estudio de la intensidad de emisiones cuando se modifica la matriz energética, siendo el alcance 2 el que aporta en menor magnitud, mientras que la cadena de valor, es decir, el alcance 3 es responsable en gran medida por las emisiones generadas.

El escenario descrito considera el cambio nacional de la matriz energética, es decir, el factor de emisión de red, y no un factor de emisión diferenciado por contrato. Esta situación, beneficia a la gran minería del cobre, puesto que al pagar contratos de energías renovables, estos podrían optar a un factor de emisión igual a cero, lo que llevaría las emisiones de alcance 2 a cero y deja la tarea de reducción de emisiones totales en el alcance 1 y 3.

4.6.3 Comparación de escenarios

Finalmente, y para concluir esta sección, se comparan ambos escenarios con un gráfico que muestra las emisiones totales cuando solo se tiene una disminución de las leyes de cobre, y cuando además de esta disminución, se considera el cambio en la matriz energética.

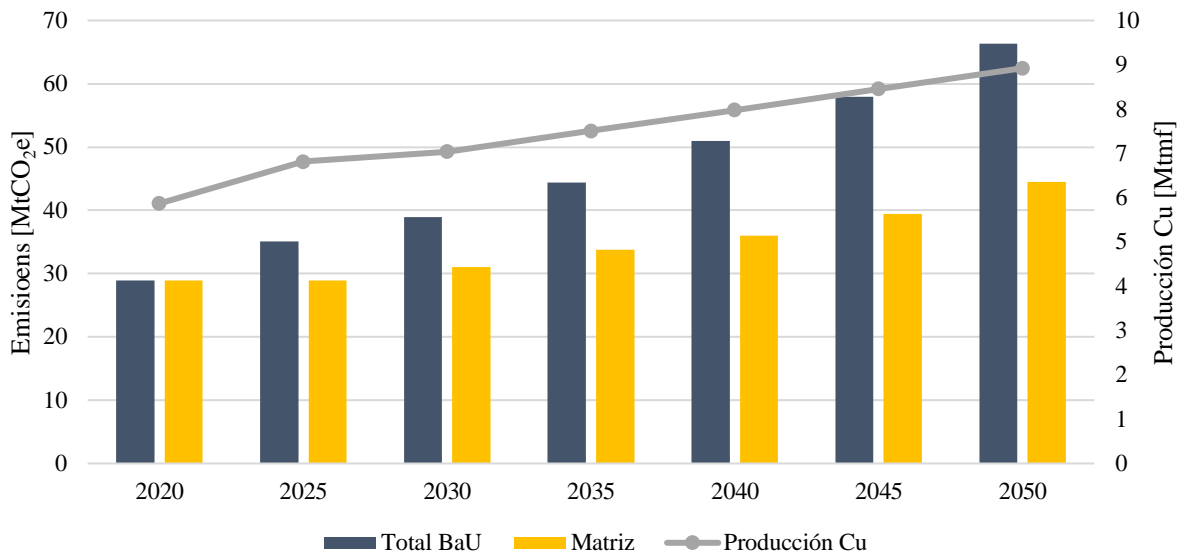


Figura 30: Comparación de emisiones totales ambos casos.

Cuando se observan ambos casos en la Figura 30 se ve cómo las emisiones crecen a mayor velocidad que la producción de cobre cuando solo se considera la disminución de las leyes y no existen cambios en la composición de la matriz energética en el país. El comportamiento que se ve entre la producción de cobre y las emisiones totales en el segundo caso justifica de forma gráfica el comportamiento del gráfico siguiente, pues la tasa de crecimiento de ambas curvas es similar para cada parámetro.

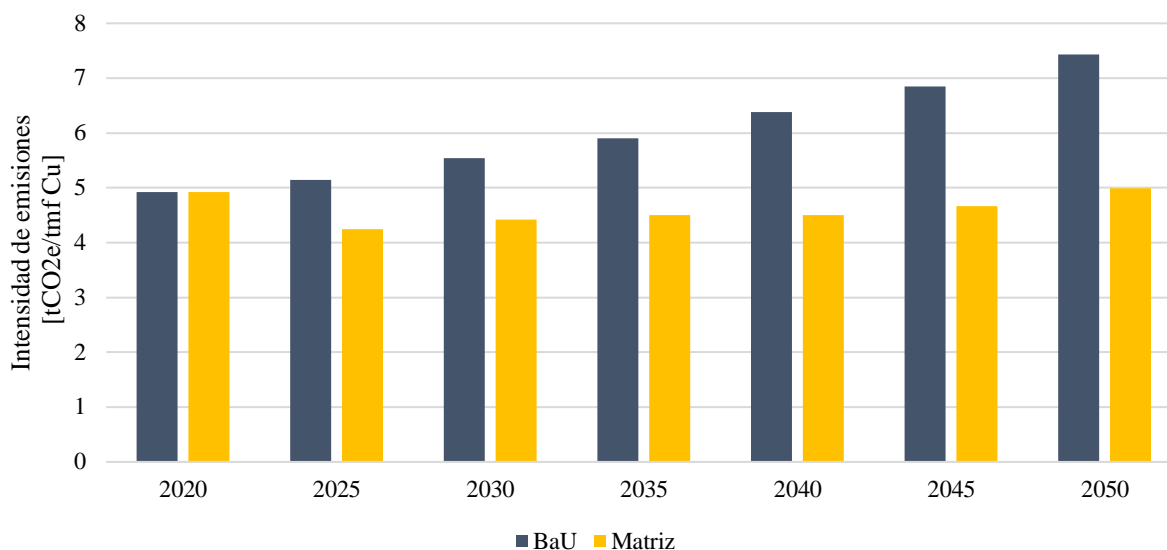


Figura 31: Comparación escenarios intensidad de emisiones.

Como se menciona de forma previa, la Figura 31 compara la intensidad de emisiones de ambos casos estudiados en esta sección, donde se ve claramente la casi estacionariedad de la intensidad cuando disminuyen las emisiones de alcance 2, y el crecimiento potencial de la intensidad para el escenario BaU. Esto evidencia la importancia de generar y reportar indicadores ambientales que sean comparables entre dos o más tecnologías, operaciones o países.

4.7 IMPACTO DE INICIATIVAS Y TECNOLOGÍAS EN LAS EMISIONES Y ANÁLISIS DE ESCENARIOS

Si bien existe un compromiso por llegar a la carbono neutralidad a nivel país, esto tiene un impacto solo en el alcance 2 de las emisiones de CO₂e de la industria minera relacionadas al cambio en la matriz energética como queda en evidencia en la sección anterior, por lo que es importante y necesario que la industria minera identifique emisiones de alcance 1 y 3 en toda la cadena de valor para poder hacer una gestión responsable de ellas. En esta línea, se plantea estudiar distintas iniciativas y tecnologías que permitan disminuir las emisiones, cuantificar este impacto, y determinar su evolución en el largo plazo.

Las iniciativas y tecnologías propuestas se detallan en los siguientes apartados.

4.7.1 Electromovilidad

Como se describe en la ruta energética 2018-2022, Chile se compromete en avanzar en el desarrollo de la electromovilidad (Ministerio de Energía, 2018b). Sin embargo, no hay indicaciones específicas sobre lo que debería suceder en la industria minera. A pesar de eso, ha estado en la discusión pública y privada del ecosistema minero la incorporación, principalmente, de camiones eléctricos (CAEX E) y/o con hidrógeno como combustible para la disminución del alcance 1. Adicionalmente, en la Política Nacional Minera 2050 publicada en enero 2022, se establece como meta al 2025 que todas las operaciones de la gran minería cuenten con planes de

flotas cero emisión, tanto para vehículos livianos como de carga, mientras que al 2030, el 100% de la gran minería inicia implementación de flotas cero emisiones (Ministerio de Minería, 2022).

Actualmente, no existen camiones eléctricos de 300 toneladas, que son los que se usan en la gran minería del cobre en Chile. El vehículo eléctrico más grande en el mundo, llamado también *eDumper*, empezó a operar a principios del 2018 en Suiza, fue fruto de un esfuerzo colaborativo entre privados, entidades públicas y academia, y fue convertido de un vehículo a diésel de Komatsu (Rizzo et al., 2018) capaz de transportar 65 toneladas. Esto significa que se requiere de un quiebre tecnológico importante para que esta pueda ser una tecnología que cumpla con los requerimientos de la industria minera del cobre.

Además, según el reporte de insumos críticos de Cochilco, el mercado de los camiones de alto tonelaje (CAEX) en Chile se ha comportado en los últimos años de la siguiente forma:

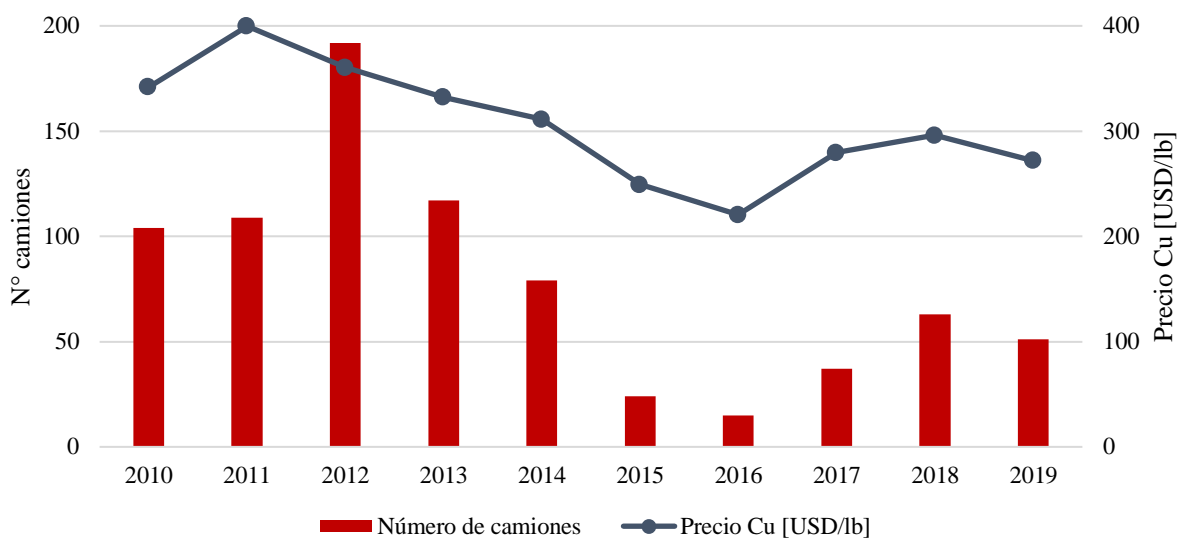


Figura 32: Número de CAEX nuevos por año y relación precio Cu, Cochilco, 2020a.

Esto significa que, si en algún momento se logra obtener el desarrollo necesario de la tecnología, la adopción de camiones eléctricos por parte de la industria no será instantánea, sino progresiva. Se puede ver en la Figura 32 que, en los últimos cinco años, en promedio, la industria nacional ha comprado solo 38 camiones llegando a un mínimo de 15 CAEX el 2016, y que el comportamiento de la tasa de recambio es cíclica, muy similar al comportamiento del precio del cobre, que se condice también, con la incorporación de grandes proyectos mineros.

De forma complementaria, es importante identificar las variables en la cuantificación de emisiones que se ven afectadas por esta tecnología. Por un lado, se tiene la disminución considerable de combustibles fósiles para el funcionamiento del equipo, lo que se traduce en una menor tasa de consumo de combustible en minería rajo, menos emisiones de alcance 1 y menos emisiones de alcance 3. Por otro lado, al ser equipos 100% eléctricos aumenta el consumo de energía eléctrica de forma considerable y con ello un aumento en las emisiones indirectas de alcance 2. Esto significa que mientras Chile siga teniendo una matriz energética que dependa de combustibles fósiles, las emisiones generadas por los camiones de extracción seguirán siendo importantes.

Adicionalmente, los vehículos eléctricos gastan en torno a un quinto de la energía que un vehículo a combustión, dado que la eficiencia de un motor de combustión no supera el 50% mientras que los motores eléctricos están sobre un 90% de eficiencia (Ministerio de Energía, 2020c).

A continuación, se muestra un gráfico de proyección de emisiones cuando se considera la disminución natural de las leyes de cobre y el cambio de la matriz energética.

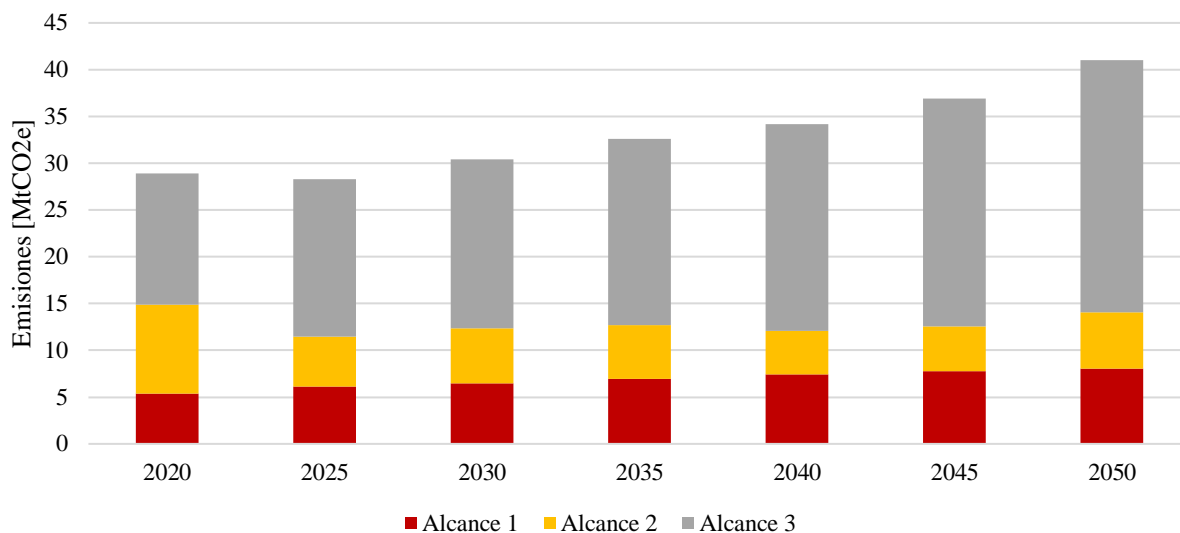


Figura 33: Proyección de emisiones con cambio en la matriz energética e incorporación de CAEX E.

De la Figura 33 se ve que entre el año 2020 y 2025 las emisiones totales disminuyen y esto se da principalmente por la disminución abrupta del cambio en la matriz energética, sin embargo, del periodo 2030 al 2050, y a pesar de que el FE sigue disminuyendo, las emisiones indirectas aumentan debido a que la demanda por el recurso energético sigue aumentando al requerir mayor mineral para obtener la misma cantidad de cobre fino. De esta forma, el año 2020 se tienen emisiones totales de 28 MtCO_{2e} y estas llegan a 41 MtCO_{2e}, mientras que las emisiones de alcance 2 disminuyen de 9.5 MtCO_{2e} el 2020 a 6.0 MtCO_{2e} al 2050.

El combustible total ahorrado se puede ver en el siguiente gráfico:

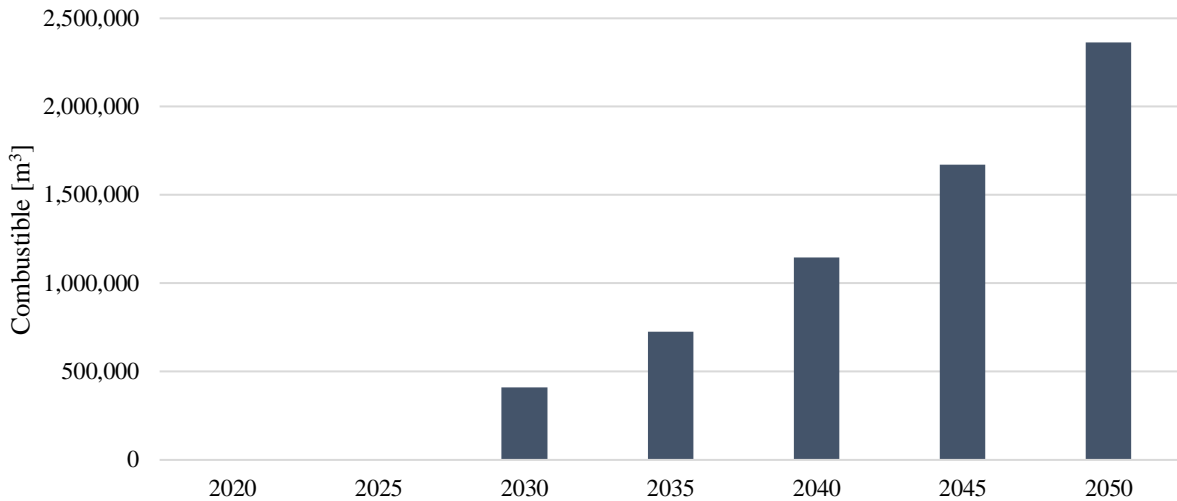


Figura 34: Ahorro de combustible con CAEX eléctricos.

De la Figura 34 se ve que tanto el 2020 como 2025 no genera un ahorro de combustible ya que en ese período se considera que la tecnología aún no está disponible, sin embargo, cuando esta se hace presente el año 2030, genera un primer ahorro de 400,000 m³, llegando a casi 6 veces más en el año 2050 con 2.3 Mm³.

Ahora, al estudiar la proporción de cada uno de los alcances en el total anual se tiene lo siguiente:

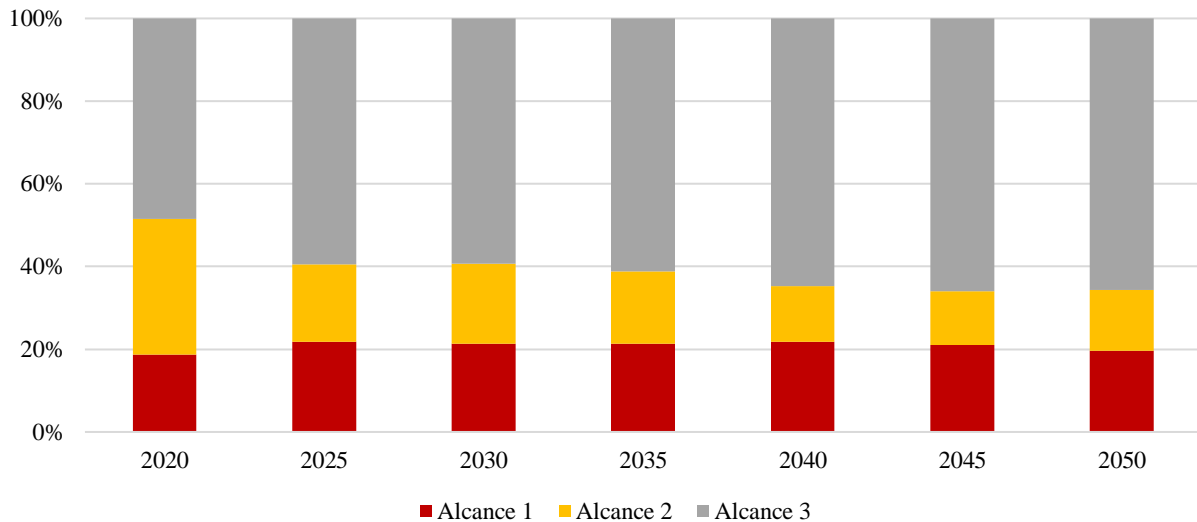


Figura 35: Participación de los alcances caso cambio en la matriz y CAEX E.

En la Figura 35 se ve el comportamiento de la participación de los distintos alcances para el caso estudiado. Las emisiones directas se mueven cerca del 20% en el periodo 2020-2050, logrando un mínimo de 19% al 2050 y un máximo de 22% el 2025, mientras que el alcance 2 va desde el 33% en el 2020, disminuyendo a un 15% al 2050. Finalmente, las emisiones de alcance 3 van del 48% al inicio del periodo y llegan a 66% de participación el 2050.

Al ver la intensidad de emisiones se puede ver el siguiente comportamiento para cada alcance.

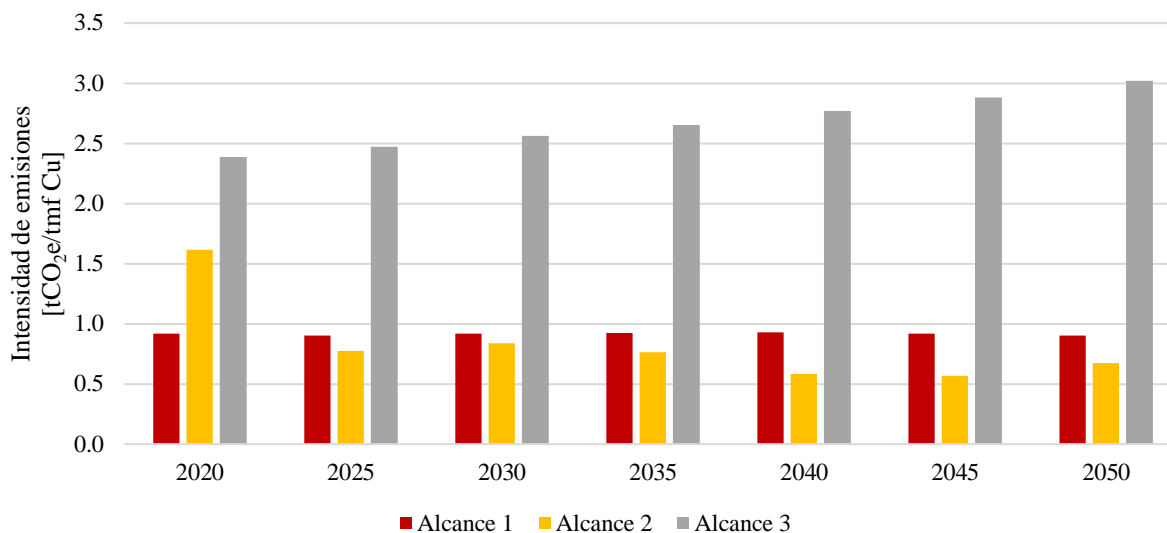


Figura 36: Intensidad de emisiones por alcance caso CAEX E con cambio matriz.

El comportamiento de la Figura 36 evidencia lo que se explicaba en los gráficos previos. La intensidad de emisiones directas se mantiene casi constante porque a pesar de que disminuye la proporción de camiones convencionales utilizados, aumenta la producción y con ello la demanda de estos equipos, mientras que la intensidad de emisiones de alcance 2 disminuye del 2020 al 2050 por el cambio en la matriz energética, sin embargo, no lo hace a la misma velocidad que el cambio de la matriz producto del aumento del consumo de energía. La intensidad de emisiones de alcance 3 aumenta de 2.4 a 3.0 tCO₂e/tmf al final del periodo.

Al comparar los dos escenarios que consideran un cambio en la matriz energética, se tiene lo siguiente:

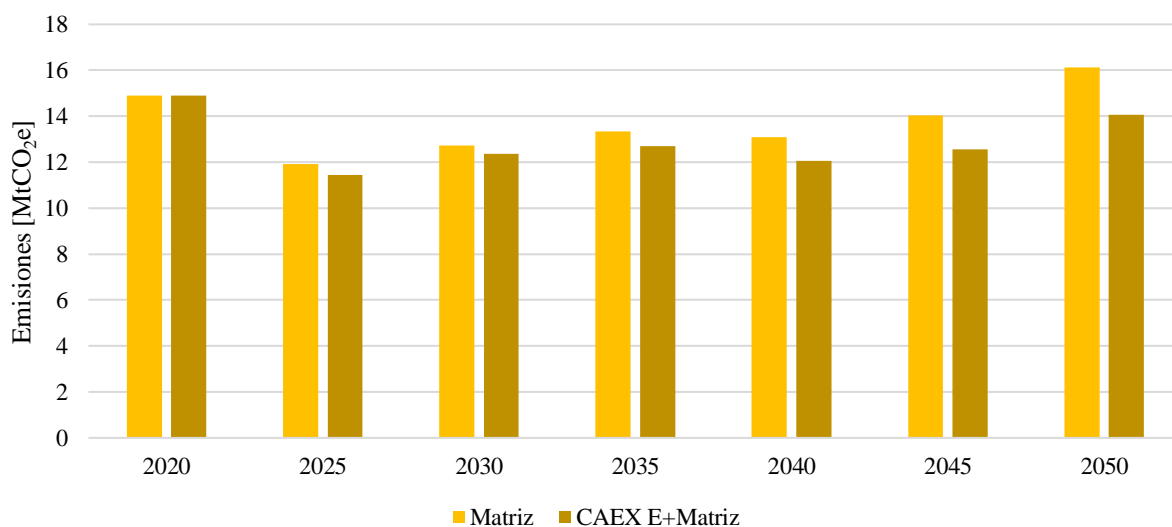


Figura 37: Comparación de escenarios cambio en la matriz.

En la Figura 37 se ve que en todo el periodo estudiado las emisiones totales cuando se considera la incorporación de camiones eléctricos se tiene una disminución de estas. Llegando al 2050 con una reducción del 8% de las emisiones totales cuando se incorporan camiones.

Para finalizar el análisis de la electromovilidad se compara este caso con los escenarios planteados previamente, obteniendo la siguiente información:

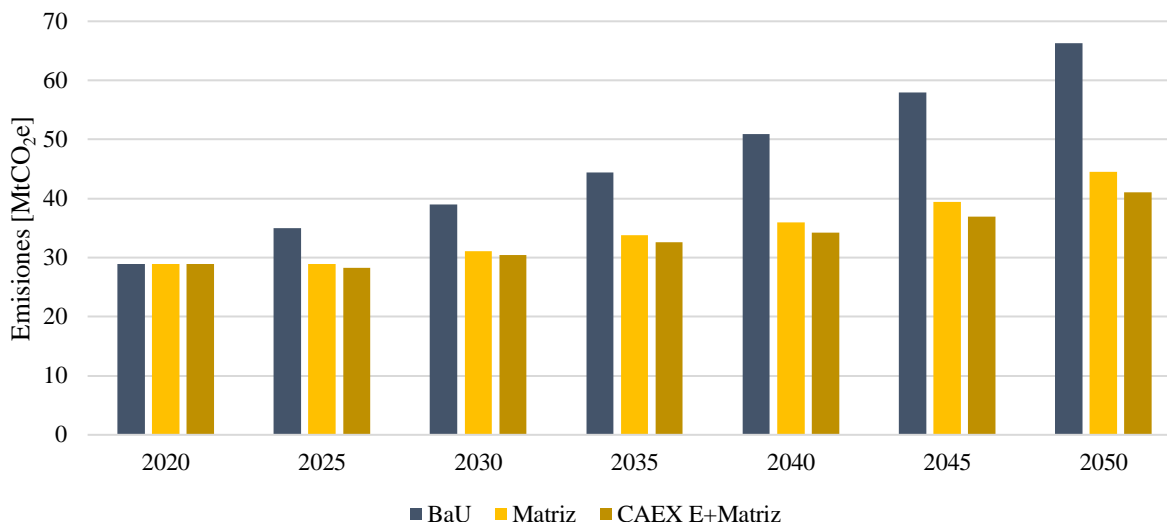


Figura 38: Comparación escenarios con cambio en la matriz y CAEX E.

Al comparar los tres escenarios estudiados hasta ahora, se tiene que el que genera una mayor cantidad de emisiones en el largo plazo corresponde al escenario BaU, mientras que el escenario con cambios en la matriz energética y la incorporación de camiones eléctricos significa una menor cantidad de emisiones en el largo plazo como se muestra en la Figura 38. Disminuyendo este último un 38% de las emisiones totales con respecto al BaU.

Esto deja en evidencia dos cosas, en primer lugar, la importancia de la descarbonización de la matriz energética en Chile ya que consiguientemente se descarboniza la industria minera, y en segundo lugar, la relevancia de cuantificar el impacto de las iniciativas y/o tecnologías prioritarias de la industria para la mitigación de sus emisiones.

Es importante tener en cuenta que la incorporación de electromovilidad es mucho más amplia que la limitación a camiones eléctricos. Es fundamental que esta tecnología se incorpore en toda la cadena de valor asociada a la producción de cobre si se quiere lograr la descarbonización de la industria, como por ejemplo, el transporte de personas a sus lugares de trabajo, y la electrificación de otros equipos utilizados en las operaciones.

4.7.2 Hidrógeno verde

El hidrógeno ha sido utilizado en distintas industrias durante años, sin embargo, se espera que el hidrógeno verde, esta molécula generada a partir de agua y energías renovables, sea la clave para la transición energética y la descarbonización en el mundo para así combatir el cambio climático.

Entre el potencial que tiene el hidrógeno verde se encuentran celdas de combustibles para medios de transporte, reemplazo de hidrógeno gris en la industria química, petroquímica, agricultura, uso en calderas y red de gases, entre otros (Ministerio de Energía, 2020a).

Cuando esta tecnología se conecta con la industria minera, se habla de usarlo principalmente como reemplazo de combustibles convencionales en camiones mineros (CAEX) y como insumo para la producción de explosivos.

Si bien el hidrógeno verde en su aplicación como combustible en los CAEX es prometedor e impacta de forma directa la cantidad de combustible utilizado y con ello las emisiones de alcance 1 y 3 sin aumentar las emisiones de alcance 2 como los camiones eléctricos, este requiere un quiebre tecnológico que aún no tiene un horizonte fijo de comercialización, pues aún no existen camiones de alto tonelaje funcionando con esta iniciativa.

A fines del año 2020, Chile publica su Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde, en la que se reconoce el potencial del país en la impulsión del hidrógeno como catalizador de la transformación energética, en la que se genera distintas propuestas para las aplicaciones de hidrógeno verde como se muestra en la ilustración que sigue.

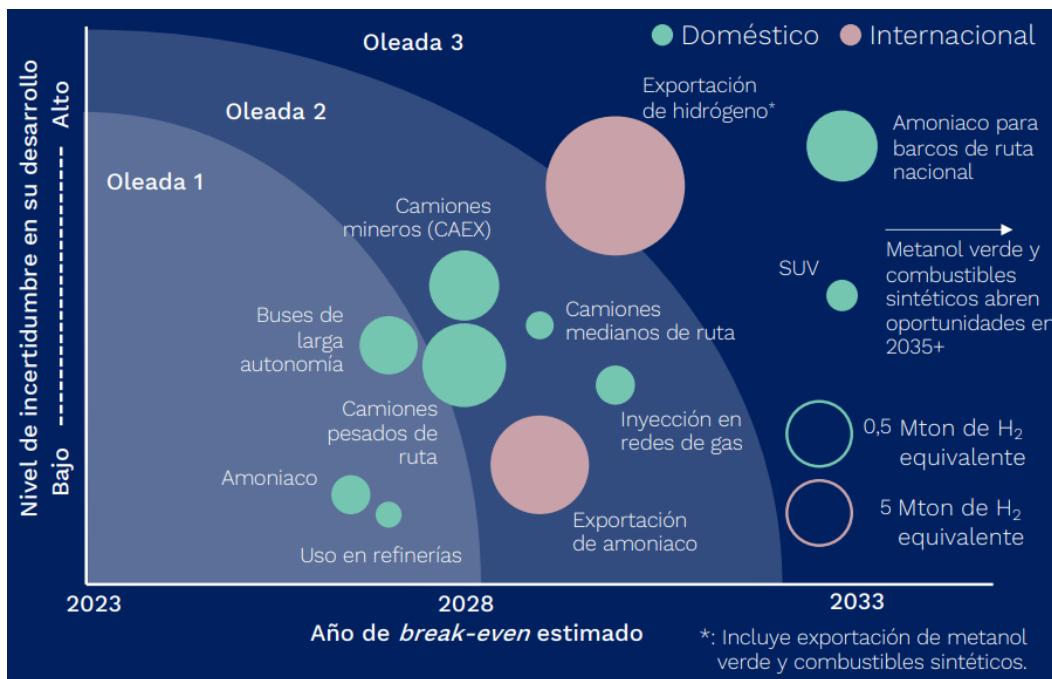


Figura 39: Desarrollo proyectado de aplicaciones de hidrógeno verde Ministerio de Energía, 2020a.

Como se plantea en la Figura 39, la aplicación de hidrógeno verde en los camiones mineros se espera posterior al 2028 con una incertidumbre media-alta. Por lo mismo, se considera un quiebre tecnológico el año 2030 partiendo con una incorporación de camiones progresiva. Así, se obtiene el siguiente comportamiento cuando, además, existe un cambio en la matriz energética.

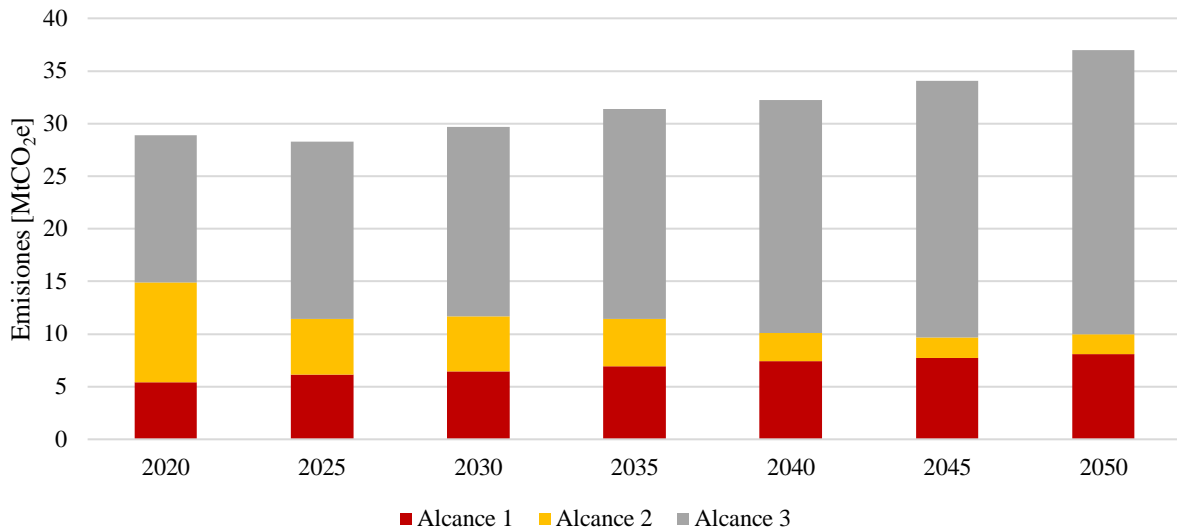


Figura 40: Proyección de emisiones con CAEX HV y cambio en la matriz.

En este escenario, si bien las emisiones de alcance 1 y 3 van aumentando, esto ocurre a una menor velocidad, sin embargo, las emisiones de alcance 2 disminuyen considerablemente al final del periodo como se ve en la Figura 40.

Al analizar las proporciones de cada uno de los alcances en el total se tiene lo siguiente:

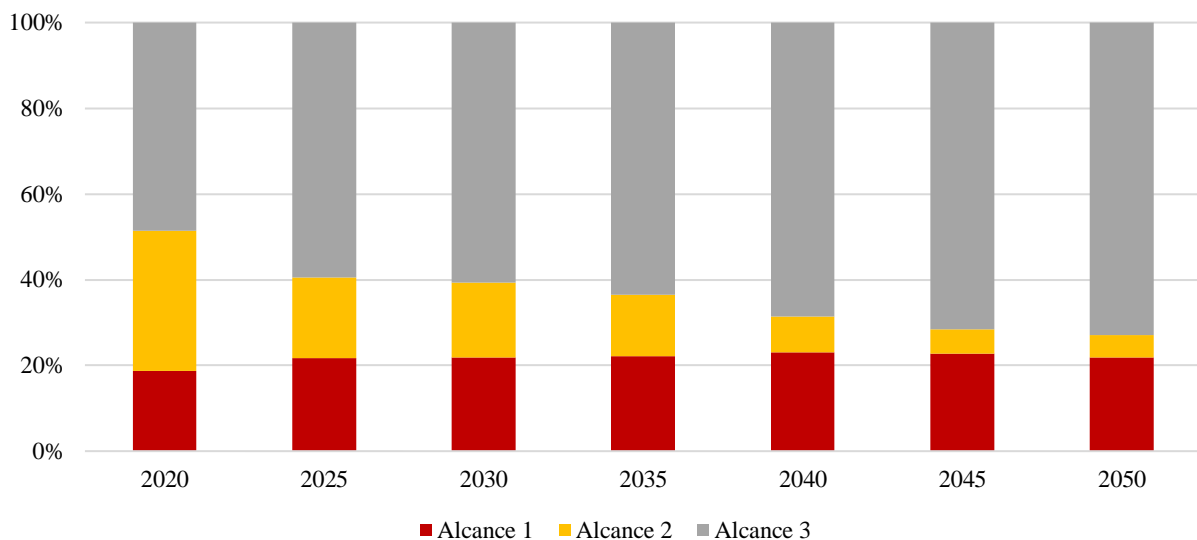


Figura 41: Participación por alcance en el total, caso CAEX HV y cambio en la matriz.

En la Figura 41 se observa cómo evoluciona la participación de cada uno de los alcances en el total. El alcance 1 pasa de tener una participación del 19% a una del 22%, el alcance 2 de 33% cae a un 5%, y el alcance 3 aumenta sustancialmente de 48% a 75% al final del periodo.

Ahora, al ver la intensidad de emisiones se tiene lo siguiente:

Tabla 22: Intensidad de emisiones caso HV con cambio en la matriz.

	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Alcance 1 [tCO ₂ e/tmf Cu]	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
Alcance 2 [tCO ₂ e/tmf Cu]	1.6	0.8	0.7	0.6	0.3	0.2	0.2
Alcance 3 [tCO ₂ e/tmf Cu]	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3.0
Total [tCO₂e/tmf Cu]	4.9	4.2	4.2	4.2	4.0	4.0	4.1

Se tiene que la intensidad proveniente de alcance 1 es casi contante y cercana a 0.9 tCO₂e/tmf Cu debido a que se compensa el aumento de la producción de cobre con el aumento del uso de recursos producto de la disminución de las leyes y la disminución de combustible por incorporación de hidrógeno verde. Mientras que la intensidad de alcance 2 cae de 1.6 a 0.2 tCO₂e/tmf Cu, y el alcance 3 aumenta 0.6 tCO₂e/tmf Cu llegando a 3 tCO₂e/tmf Cu como se ve en la Tabla 22. Información que se puede complementar con el siguiente gráfico:

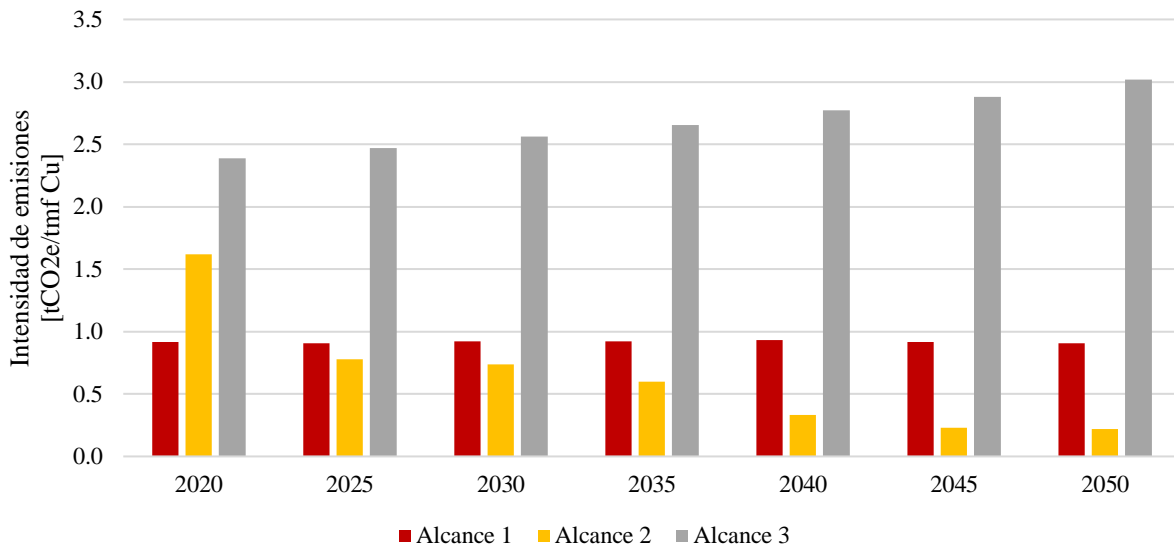


Figura 42: Intensidad de emisiones por alcance caso CAEX HV y cambio en la matriz.

Con la Figura 42 se ve claramente que la intensidad de emisiones de alcance 1 es casi constante, mientras que la del alcance 2 disminuye considerablemente al disminuir el factor de emisión de la matriz energética y al no tener que reemplazar la energía de camiones convencionales por energía eléctrica cuando se tiene hidrógeno verde.

Al comparar los cuatro escenarios que se han estudiado, se tiene lo siguiente:

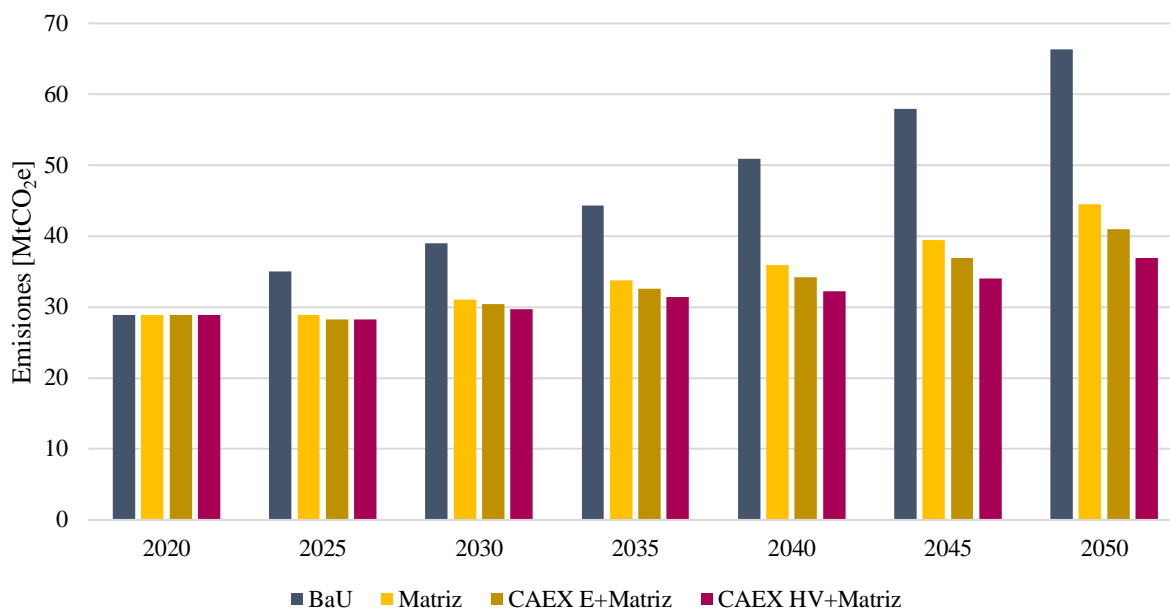


Figura 43: Comparación de escenarios: BaU, matriz, CAEX E, CAEX HV.

El escenario que genera una mayor reducción de emisiones corresponde al escenario donde hay un cambio en la matriz energética y además se incorporan camiones a hidrógeno verde en la industria, lo que representa una disminución del 44% con respecto al BaU como se muestra en la Figura 43.

Si bien esta tecnología es la que genera un mayor impacto, se espera que esté disponible al menos el año 2030, lo que significa que, si la velocidad de madurez de tecnología no es lo suficientemente rápida para llegar a ese año, una vez que se tenga disponible, la tasa de recambio de camiones debería ser mucho más rápida para lograr una reducción de emisiones mayor.

Otro de los usos del hidrógeno verde corresponde a su uso en la industria química, de hecho, corresponde a la segunda fuente de demanda de hidrógeno actualmente, con una producción de amoníaco de 31 Mt H₂/año y una producción de metanol de 12 Mt H₂/año (B2B, 2021). Este insumo es esencial para la fabricación de explosivos utilizados en la minería, por lo que producir amoníaco en Chile y generar explosivos verdes tendría un impacto en la disminución de alcance 3 de la industria minera, ya que se disminuyen las emisiones por la producción de amoníaco, y además se reducen las emisiones por el transporte de este insumo al aumentar la producción local.

4.7.3 Operaciones más eficientes – Análisis de sensibilidad

En la sección 4.5 EMISIONES INDUSTRIA DEL COBRE, donde se plantea que las emisiones de alcance 3 corresponden a casi al 50% de las emisiones totales, se identifican los insumos críticos en función de esta misma variable. Por eso, y teniendo en cuenta que los parámetros principales en el desarrollo de la herramienta de cálculo corresponden a tasas de consumo y factores de emisión, se decide analizar el impacto de tener operaciones mineras más eficientes.

De esta forma, se plantean operaciones eficientes cuando las tasas de consumo de los insumos críticos son menores, es decir, se requieren menos insumos para tratar un tonelada de mineral u obtener una tonelada de cobre, y operaciones ineficientes en el caso contrario.

Para estudiar el impacto de operaciones más eficientes se consideran los insumos críticos definidos en la sección 4.5.3 Alcance 3, es decir, bolas de molienda, ácido sulfúrico, y explosivos como se muestra en la Figura 19. Los combustibles se dejan fuera de esta sección ya que se comentan en la iniciativa de Eficiencia Energética. Así, se estudia el impacto de la reducción de tasas de consumo para el año inicial del periodo considerado obteniendo los siguientes resultados.

Bolas de molienda

En este caso se considera un cambio del $\pm 20\%$, es decir, la tasa de consumo es más eficiente cuando de 700 g acero/t mineral se pasa a 560 g de acero/t mineral. Mientras que es ineficiente cuando esta aumenta a 840 g de acero/t mineral.

De esta forma, modificando la tasa de consumo e identificando que solo afecta a 3 de los 5 grupos considerados ya que el resto utiliza hidrometalurgia, se tiene los siguientes resultados:

Tabla 23: Emisiones totales con cambio tasa de consumo bolas de molienda.

	Mejor caso [-20%]	Caso inicial	Peor caso [+20%]
Alcance 1 [MtCO _{2e}]	5.35	5.35	5.35
Alcance 2 [MtCO _{2e}]	9.35	9.35	9.35
Alcance 3 [MtCO _{2e}]	13.19	13.53	13.87
Total [MtCO_{2e}]	27.89	28.23	29.57

De la Tabla 23, en la que se muestran las emisiones totales producto de la eficiencia o ineficiencia en la tasa de consumo de las bolas de molienda, se puede ver que este parámetro solo afecta las emisiones de alcance 3 de la industria, lo que se traduce en un aumento o disminución de 2.5% en las emisiones de alcance 3, y un aumento o disminución de 1.2% en las emisiones totales de la industria.

Ahora, al estudiar el segundo insumo crítico en torno a emisiones de alcance 3, se tiene:

Ácido sulfúrico

Al igual que el caso anterior, se considera un cambio del $\pm 20\%$, es decir, la tasa de consumo es más eficiente cuando de 4.93 t ácido/t cátodo SxEw se pasa a 3.94 t ácido/t cátodo SxEw. Mientras que es ineficiente cuando esta aumenta a 5.92 t ácido/t cátodo SxEw.

Tabla 24: Emisiones totales con cambio tasa de consumo ácido sulfúrico.

Parámetro	Mejor caso [-20%]	Caso inicial	Peor caso [+20%]
Alcance 1 [MtCO _{2e}]	5.35	5.35	5.35
Alcance 2 [MtCO _{2e}]	9.35	9.35	9.35
Alcance 3 [MtCO _{2e}]	13.21	13.53	13.85
Total [MtCO_{2e}]	27.91	28.23	28.55

De la Tabla 24, en la que se muestran las emisiones totales producto de la eficiencia o ineficiencia en la tasa de consumo del ácido sulfúrico, se puede ver que este parámetro solo

afecta las emisiones de alcance 3 de la industria, lo que se traduce en un aumento o disminución de 2.4% en las emisiones de alcance 3, y un aumento o disminución de 1.1% en las emisiones totales de la industria. Esta modificación en solo afecta los grupos 1 y 2 definidos, pues el ácido sulfúrico se considera un insumo para los procesos ligados a la hidrometalurgia del cobre.

Explosivos

Para el último caso también se considera un cambio de $\pm 20\%$, es decir, en minería a cielo abierto la tasa de consumo es más eficiente cuando de 150 g/t material se pasa a 120 g/t material. Mientras que es ineficiente cuando esta aumenta a 180 g/t material. Y en minería subterránea es más eficiente cuando esta pasa de 70 g/t material a 56 g/t material y es ineficiente cuando esta aumenta a 84 g/t material.

Tabla 25: Emisiones totales con cambio tasa de consumo explosivos.

	Mejor caso [-20%]	Caso inicial	Peor caso [+20%]
Alcance 1 [MtCO _{2e}]	5.33	5.35	5.37
Alcance 2 [MtCO _{2e}]	9.35	9.35	9.35
Alcance 3 [MtCO _{2e}]	13.29	13.53	13.77
Total [MtCO_{2e}]	27.97	28.23	28.49

Como los explosivos generan emisiones en la tronadura, además de la carga que tienen asociada previa al ingreso a la operación, la modificación de la tasa de consumo afecta tanto alcance 1 como alcance 3, tal como se muestra en la Tabla 25. Este análisis genera una disminución de $\pm 0.3\%$ en las emisiones directas, un $\pm 1.8\%$ en las emisiones de alcance 3, y un $\pm 0.9\%$ en las emisiones totales. Los grupos de operaciones que explotan por minería a cielo abierto son las más preponderantes en este cambio ya que la tasa de consumo es un poco más del doble que en minería subterránea.

Con todo lo anterior se destaca la importancia de la mejora continua en los procesos, ya que mejoras operacionales no solo implican disminución de costos, sino que tienen externalidades que pueden ser reflejadas en la disminución de emisiones. Finalmente, es importante entender que lograr las metas de descarbonización corresponden a una suma de factores e iniciativas dentro de la operación o en la toma de decisiones de las compañías.

4.7.4 Energías renovables

Esta iniciativa genera una fuerte disminución en el alcance 2 de la industria, ya que afecta el factor de emisión de la matriz energética. La industria minera tiene al menos tres mecanismos para la incorporación de energías renovables (ER). La primera, y la más utilizada por el sector corresponde a la generación de contratos con el generador para solicitar que el suministro sea de fuentes renovables. La segunda corresponde al uso directo de ER en los procesos como calentamiento de soluciones en lixiviación con proyectos propios, y la tercera contratos de compraventa de energía (PPA) donde la compañía participa en la inversión de proyectos ERNC (Generadoras de Chile, 2020).

La Política Nacional Minera 2050 indica que al 2021 un 36.2% de la energía utilizada en la industria minera venía de fuentes renovables por contratos con las generadoras (Ministerio de Minería, 2022) y esperan que al 2023 este número crezca a 49.2%. Como meta en esta misma

línea, esperan que al 2030 un 90% de los contratos de energía eléctrica del sector venga de ERNC y que este aumente a un 100% el 2050.

En cuanto a uso directo de energías renovables, la industria ha estado desarrollando algunos proyectos para su implementación. Entre los que se destacan: la planta fotovoltaica de AngloAmerican ubicada sobre el relave La Tórtolas en la región Metropolitana. Iniciativa que consiste en 256 paneles con una capacidad de 150,000 kWh al año y que durante 2020 generó 510 GJ que se traducen en una reducción de 54 tCO₂ (AngloAmerican, 2021). Se destaca también la Planta Solar Térmica “Pampa Elvira Solar”, que fue inaugurada en 2013 y abastece de energía solar térmica a la División Gabriela Mistral de CODELCO (Ministerio de Energía, 2018), tienen un aporte energético de 54,000 MWh por año y cubre el 85% del combustible fósil del proceso de electroobtención, lo que tiene un ahorro de 15,000 tCO₂ al año (Energía Llaima, 2016).

Si bien son ejemplos que destacan por su innovación e implementación en la industria, es necesario que iniciativas como estas se sigan extendiendo en el sector minero, pues actualmente, este tiene una alta dependencia en contratos de energías renovables con las generadoras, pero la matriz energética sigue teniendo como principal fuente de generación a las termoeléctricas, lo que significa que de igual forma se tienen emisiones GEI indirectas. De forma adicional, la industria minera debería seguir trabajando en la reducción del consumo energético y una disminución en la intensidad de energía utilizada para un aporte más significativo a la mitigación del alcance 2.

4.7.5 Eficiencia energética

La energía eléctrica utilizada en la industria corresponde a casi el 35% de la energía utilizada a nivel nacional y se espera que en el periodo 2021-2032 esta tenga fluctuaciones con un máximo de 39% y un mínimo de 34% del total nacional (Cochilco, 2022). Mientras que la industria tuvo un consumo de 84,300 TJ el 2020, que significa un aumento del 116% desde el año 2001 (Cochilco, 2021c). Esto es un claro ejemplo de la intensidad de uso del recurso energético por parte del sector minero, por lo que urgen esfuerzos por tener una industria más responsable con su consumo.

En línea con lo anterior y pensando en la carbono neutralidad del país, a inicios del 2021 se oficializa la Ley N°21,305 sobre Eficiencia Energética (EE), que busca promover el uso racional y eficiente de los recursos energéticos (Biblioteca del Congreso Nacional, 2021). En el marco de esta ley se desarrolla el Plan Nacional de Eficiencia Energética 2022-2026 que tiene como meta reducir en un 4% la intensidad energética de los grandes consumidores al 2026 y en un 25% la intensidad energética promedio de los grandes consumidores al 2050, además de la implementación de Sistemas de Gestión de Energía (SGE), el reporte anual de los consumos de energía y otros indicadores para su debida fiscalización (Ministerio de Energía, 2022).

Pero cuando se habla de medidas de eficiencia energética estas pueden ser clasificadas en: i) medidas de diseño y ii) medidas de operación. Las primeras se definen antes del inicio de un proyecto, mientras que las segundas ocurren en el transcurso de un proyecto (Agencia de Sostenibilidad Energética, 2020). Además, estas medidas pueden ser clasificadas en:

- De transporte.
- Térmicas.

- De gestión.
- Eléctricas.
- De extracción.

Entre las que se pueden mencionar caracterización del macizo rocoso, buen diseño de tronadura, optimización en trayectoria de equipos de transporte, control de tamaño de partículas en los equipos de conminución, equipos de conminución más eficientes en el uso de energía, implementación de sistemas de control, mejora en aislamiento térmico de hornos, mitigación de fugas en sistemas de compresión de aire y optimización de los procesos.

Considerando la meta del Plan Nacional de Eficiencia Energética de reducir en un 4% la intensidad energética al 2026, se estudia el impacto que tiene esta meta en los procesos críticos tanto para el uso de combustibles como energía eléctrica, que corresponde a Mina Rajo en el uso de combustibles y Concentradora para el caso de electricidad como se detalla en las secciones 2.4 CONSUMO DE COMBUSTIBLE EN MINERÍA y 2.5 CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN MINERÍA.

Eficiencia energética Mina Rajo

Esto hace referencia a la disminución en la tasa de consumo del combustible en Mina Rajo, por lo tanto, tomando en cuenta el Plan Nacional de Eficiencia Energética, se considera una disminución en la intensidad de consumo al 2025 de 4% y al 2050 de 25%, obteniendo el siguiente comportamiento en el periodo de estudio:

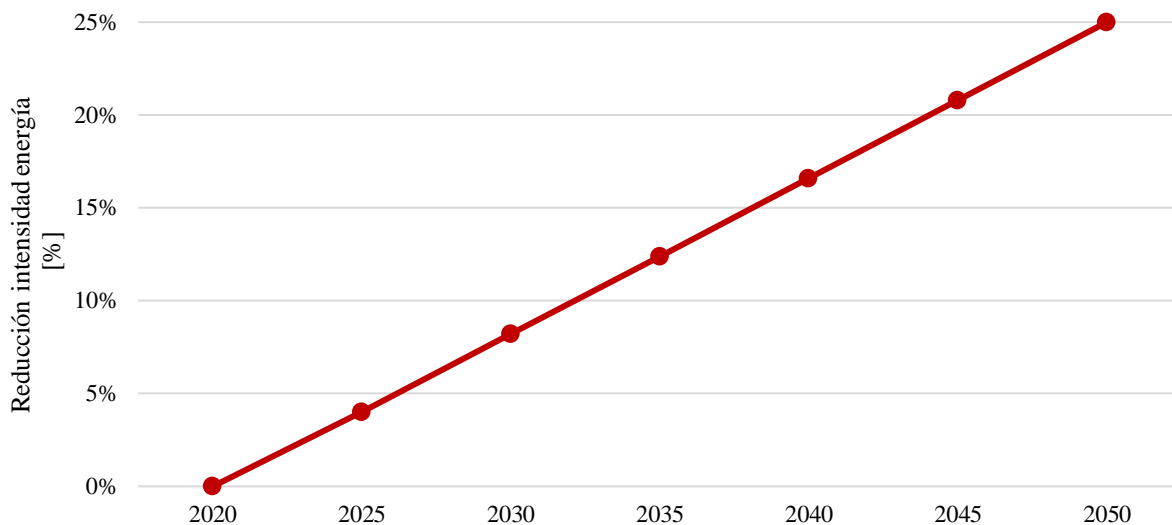


Figura 44: Proyección reducción intensidad de consumo energía.

Siguiendo la Figura 44, y en función de las metas propuestas, en el periodo 2020-2050 se tiene una comportamiento lineal en la reducción de la intensidad de consumo tanto de energía eléctrica como de combustible. De esta forma, analizando el proceso crítico en el uso de combustible, las emisiones deberían comportarse de la siguiente forma:

Al estudiar esta iniciativa cuando existe un cambio en la matriz energética, se tiene el siguiente comportamiento de las emisiones:

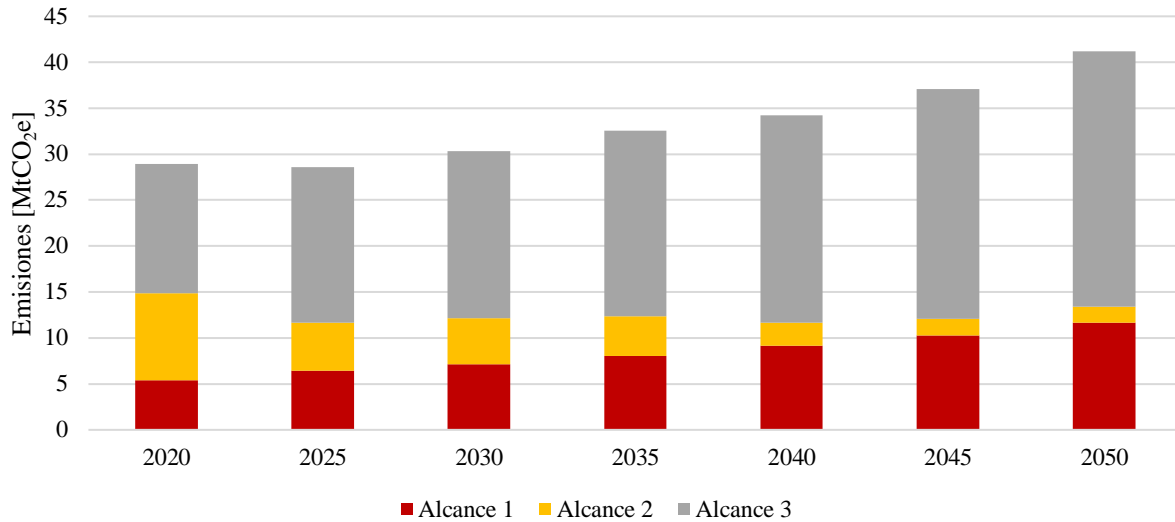


Figura 45: Proyección de emisiones caso Matriz con EE Mina rajo.

De la Figura 45 se ve que del año 2020 al 2025 existe una leve disminución de las emisiones, pero a partir del 2025 estas aumentan llegando a un total de 41.2 MtCO₂e. Se ve además que las emisiones de alcance 2 son las que tienen una menor participación en el largo plazo producto del cambio en el factor de emisión de la matriz energética.

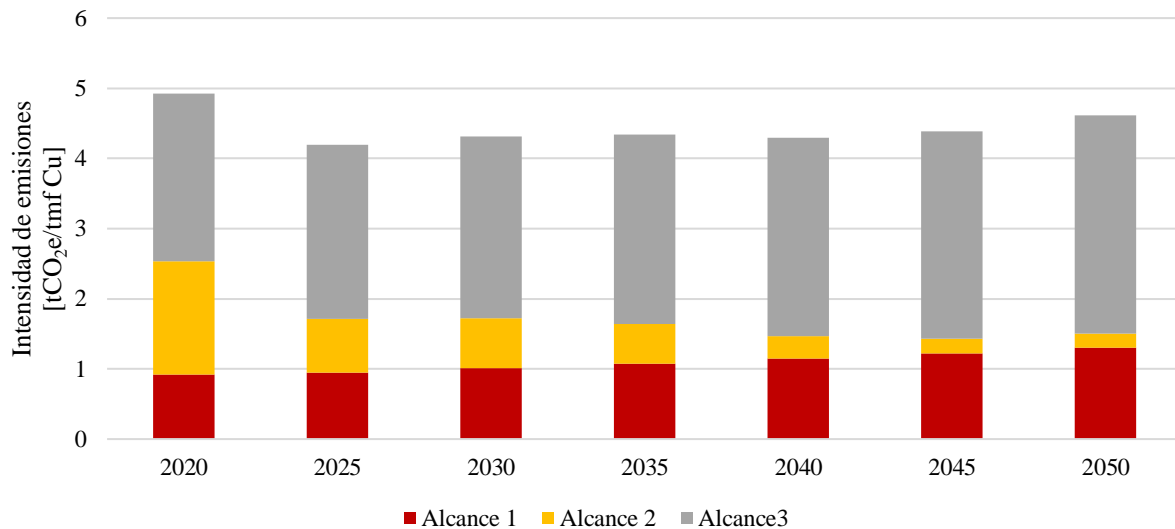


Figura 46: Proyección intensidad de emisiones caso Matriz y EE Mina rajo.

A diferencia de todos los casos estudiados hasta ahora, cuando se incorpora EE en la mina rajo y además cambia la matriz energética nacional, la intensidad de emisiones totales en el periodo 2025-2050 nunca supera las del año 2020 como se observa en la Figura 46.

Al estudiar la proporción de cada uno de los alcances en el total se tiene:

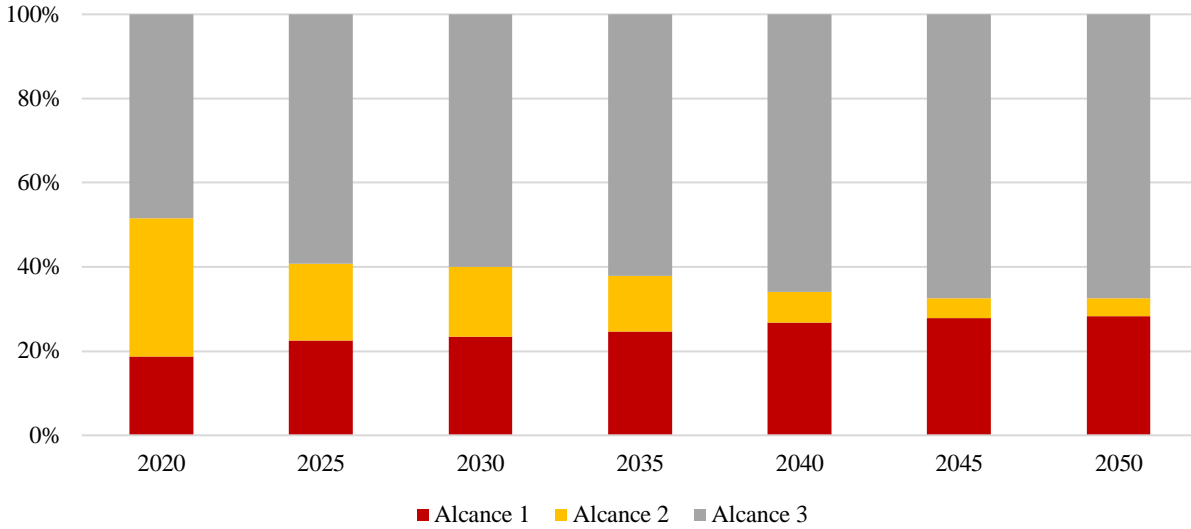


Figura 47: Proporción por alcance caso Matriz y EE Mina rajo.

Como se muestra en la Figura 47, la participación del alcance 1 va aumentando desde un 19% a un 28% al 2050, mientras que el alcance 2 disminuye su participación de un 33% a un 4%, y el alcance 3 aumenta de un 48% a un 67% en el mismo periodo. Esto ocurre porque a pesar de que existe una disminución en el uso de combustibles, la velocidad de reducción del factor de emisión de la matriz energética es mucho más rápida y tiene un mayor impacto.

Eficiencia energética Concentradora

Tomando en cuenta la misma reducción de intensidad energética propuesta por la PNM2050, los datos de la Figura 44, y el cambio en la matriz energética, al determinar la proyección de las emisiones se tiene lo siguiente:

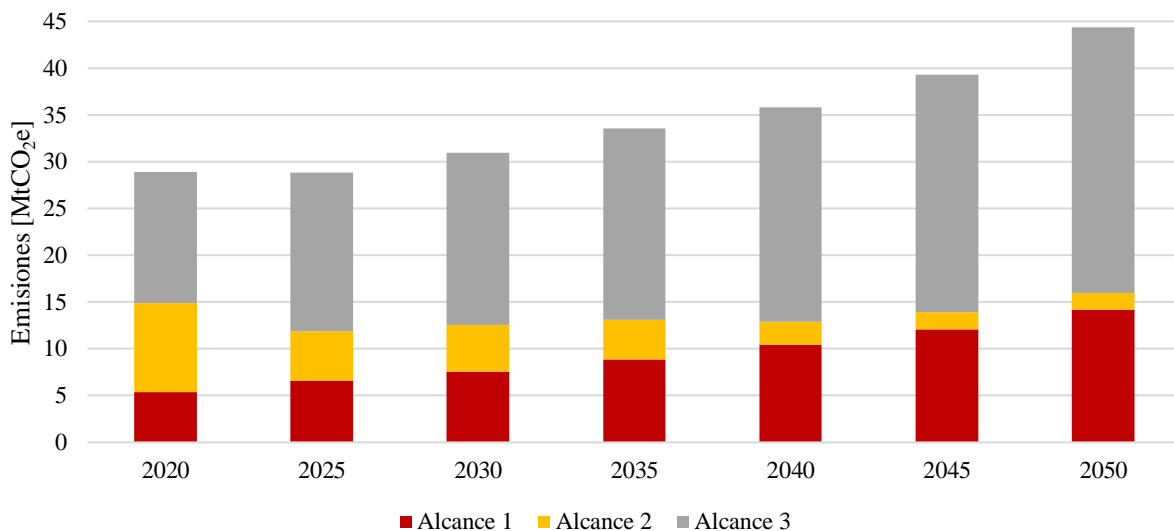


Figura 48: Proyección de emisiones cambio en la matriz y EE concentradora.

A diferencia del caso anterior, se puede ver que al aumentar la eficiencia energética en la concentradora cuando además existe un cambio en la matriz, las emisiones totales disminuyen considerablemente, e incluso se aprecia el cambio en la proporción del alcance 2 como se muestra en la Figura 48. El total de emisiones pasa de 28.2 MtCO₂e el 2020 a 44.4 MtCO₂e al 2050. Por alcances, se tiene que tanto el alcance 1 como el alcance 3 se mantienen, mientras que el alcance 2 disminuye de 9.5 MtCO₂e a 1.8 MtCO₂e, lo que significa una disminución del 81%.

Ahora, al estudiar la intensidad de emisiones se tiene:

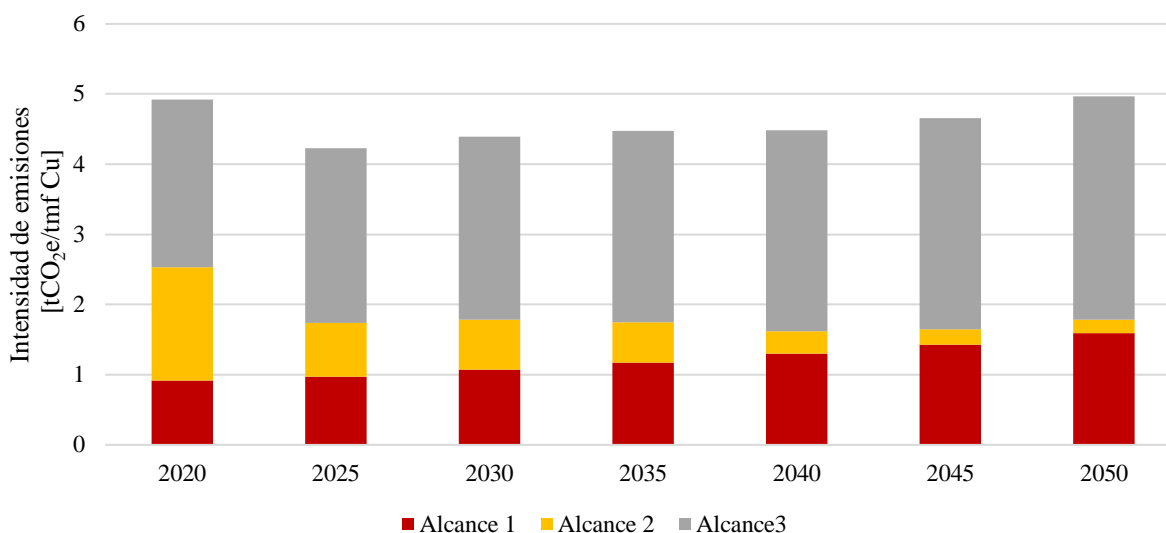


Figura 49: Proyección de intensidad de emisiones caso Matriz y EE concentradora.

Como se ve en la Figura 49 las emisiones totales se mantienen casi constantes en el periodo de estudio, disminuyendo de 4.9 a 4.2 tCO₂e/tmf Cu del 2020 al 2025, y desde ese año al 2050 aumentando hasta 5.0 tCO₂e/tmf Cu. Y si bien la intensidad de emisiones del alcance 2 disminuye en gran medida, tanto alcance 1 como alcance 3 aumentan.

Al estudiar la participación de cada uno de los alcances, se tiene:

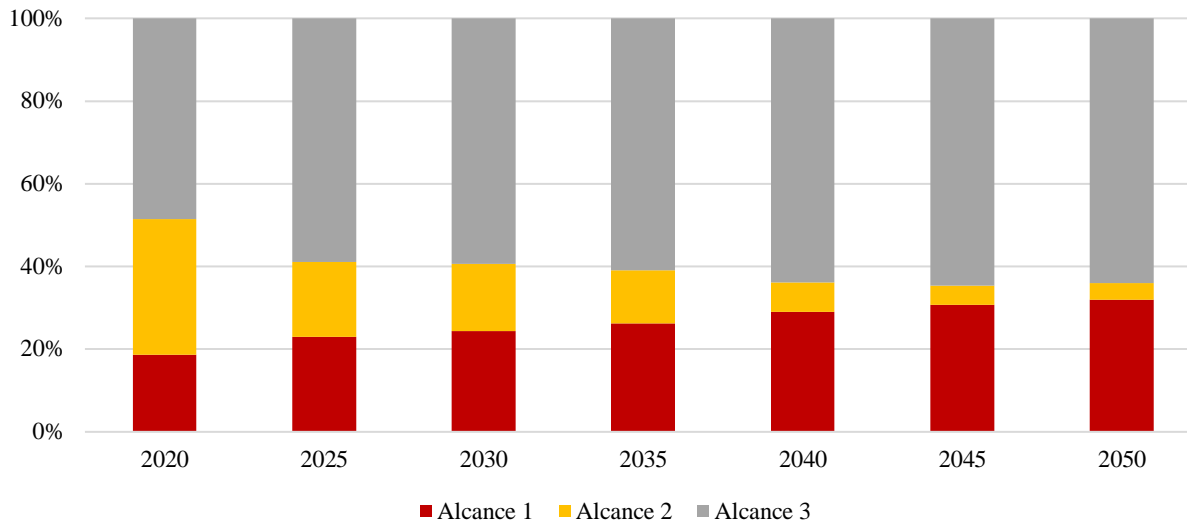


Figura 50: Participación por alcance caso Matriz y EE concentradora.

Se ve, en la Figura 50, cómo drásticamente el alcance 2 pasa de tener un tercio de participación el 2020 a casi un 4% al 2050. Mientras que el alcance 1 aumenta su participación de un 19% a un 32%, y el alcance 3 de un 48% a 64%.

4.7.6 Capacidad de fundiciones y refinerías

Las fundiciones y refinerías (FURE) tienen asociadas externalidades negativas y han estado ligadas a las polémicas zonas de sacrificio en el país. Sin embargo, aumentar la capacidad de tratamiento de estas o construir nuevas fundiciones podrían reducir las emisiones a nivel global, puesto que, al aumentar la capacidad de tratamiento, se estaría exportando el producto final, y no un producto intermedio que contiene una gran proporción de ganga, lo que implica un aumento en el volumen transportado tanto de las operaciones a los puertos, como de los puertos de salida a los países de exportación para luego ser refinados. Además, como se expone en la sección 4.5.3 Alcance 3, Figura 16, el factor de emisión de la matriz energética de China está por sobre el promedio e incluso es mucho mayor que el de Chile, Perú y Japón, lo que se traduce en mayores emisiones. No obstante, según datos de Cochilco, los costos de las fundiciones en Chile no son competitivas si se comparan con el exponencial crecimiento que han tenido las fundiciones en China y los bajos costos de estas.

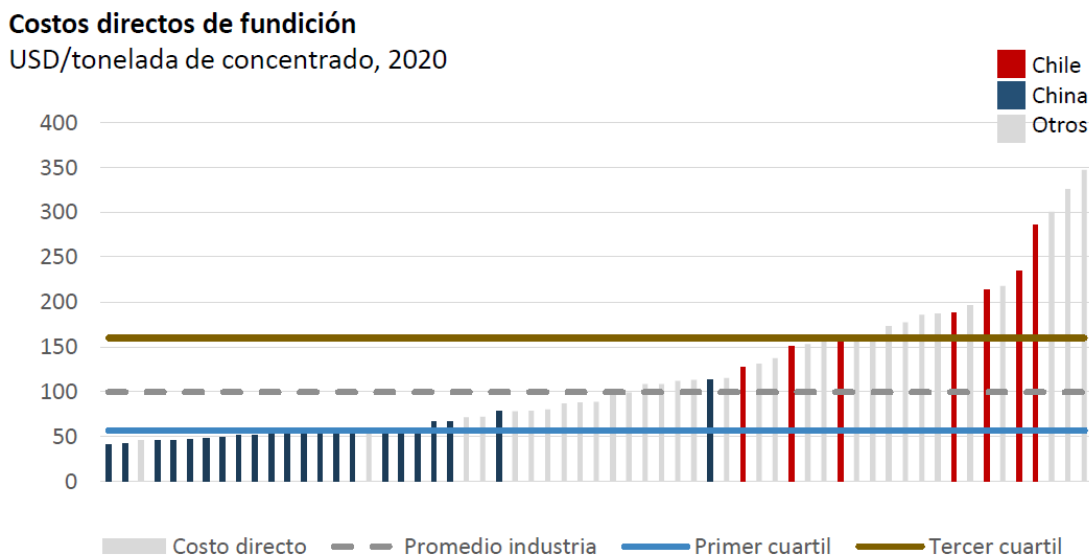


Figura 51: Costos directos de fundición Cochilco, 2021d.

Como se ve en la Figura 51, las fundiciones chilenas se encuentran sobre el promedio y más del 50% se encuentra sobre el cuarto cuartil de costos, mientras que el 82% de las fundiciones en China están dentro del primer cuartil de costos.

Adicionalmente, las fundiciones chilenas son antiguas, siendo Altonorte la más moderna del país y fue construida en 1993 (Cochilco, 2021d). Esto significa que para aumentar la capacidad de producción de forma competitiva y responsable con el entorno, es necesario incorporar nuevas tecnologías, las que han seguido tendencias como: permitir procesos continuos, mayores tasas de reacción en los procesos, menores pérdidas de cobre, y un adecuado control de gases (Cochilco, 2015b). Alcanzar mejores estándares operacionales y utilizar tecnologías más limpias pueden significar una reducción en las emisiones y generar valor agregado al cobre producido en Chile.

4.7.7 COVID-19

La pandemia que inició fuertemente en marzo del 2020 en el país creó nuevos desafíos, sin embargo, llevó a la creación de nuevas oportunidades para seguir transformando la industria minera.

Según un estudio de *Accenture*, esta transformación se puede distinguir en dos grupos: el primero corresponde a la aceleración de la agenda de transformación digital, y la segunda, las nuevas estrategias requeridas para asegurar productividad con una parte importante de las y los trabajadores trabajando de forma remota (Accenture, 2021).

El segundo punto que se menciona genera un impacto directo en las emisiones de alcance 3, ya que al tener menos personas trabajando en las operaciones se disminuyen tanto los viajes interregionales como aquellos que van diariamente desde los hogares a las operaciones, que se traduce en una disminución de la categoría 7 de alcance 3 asociados al transporte del personal.

Otra de las categorías de alcance 3 que se ve impactada de forma positiva frente a la pandemia corresponde a la categoría 6 relacionada a viajes de negocios, puesto que con las restricciones internacionales y la suspensión de eventos masivos, estas actividades o fueron canceladas o se llevaron a cabo de forma remota, disminuyendo de forma considerable la cantidad de viajes de negocios realizados, permitiendo además, repensar algunas actividades que consideraban un gran movimiento de personas dentro de una compañía.

4.7.8 Soluciones basadas en la naturaleza

Las soluciones basadas en la naturaleza (SbN) se refiere a aquellas iniciativas que buscan utilizar las funciones de los ecosistemas para resolver los problemas que enfrenta la sociedad (IUCN, 2017a) tales como disponibilidad del agua, creciente riesgo de desastres naturales o cambio climático (WWF, 2017). Las SbN ofrecen beneficios transversales a distintos sectores y pueden ser útiles tanto para mitigar las consecuencias del cambio climático como para posibilitar la adaptación a este (Oliver et al., 2021). Y si bien no tienen un impacto directo en la reducción de emisiones del sector minero, si permite la captura de CO₂, lo que se traduce en una colaboración en la carbono neutralidad de este.

Entre los ejemplos de soluciones basadas en la naturaleza, se pueden mencionar: protección y recuperación de manglares, estuarios y playas; conservación y restauración de humedales; protección y restauración de arrecifes coralinos para la protección costera y hábitat; cultivar en terrazas para reducir erosión y aumentar infiltración en laderas; creación de derivaciones naturales para reducir inundaciones río abajo, restauración de paisajes para reducir el impacto de inundaciones, estabilizar pendientes y asegurar agua limpia; y reconectar ríos a llanuras de inundación y acuíferos (IUCN, 2017b).

Al estudiar lo que está haciendo la industria en torno a esta iniciativa, se tiene que Antofagasta Minerals dentro de su Estrategia de Cambio Climático publicada el 2021, plantea como área de trabajo las SbN para la captura de CO₂ dentro del pilar estratégico de “Gestión Ambiental y Biodiversidad”. La única iniciativa relacionada se refiere a cuatro de las áreas protegidas de Los Pelambres: Laguna Conchalí, Monte Aranda, Quebrada de Llau-Llau y Cerro Santa Inés, que en total suman más de 27,000 hectáreas. En el mismo reporte se indica que estos ecosistemas han sido estudiados en 2015 y 2019 para determinar la capacidad de absorción de carbono, sin embargo, no se reportan indicadores.

Si se tiene en cuenta la información obtenida en las subsecciones anteriores, la industria minera requiere tanto una aceleración en la incorporación de estas iniciativas y tecnologías, así como tener en cuenta iniciativas tales como soluciones basadas en la naturaleza para la captura de carbono, puesto que llegar a la carbono neutralidad solo con la mitigación de emisiones parece no ser suficiente.

4.7.9 Compilación impacto de iniciativas y tecnologías

Como resumen se presenta la siguiente tabla en la que se identifican los principales parámetros que se ven afectados por las distintas iniciativas y tecnologías estudiadas.

Tabla 26: Parámetros afectados por las tecnologías/iniciativas.

Tecnología/iniciativa	Alcance	Parámetros afectados
Electromovilidad	Alcance 1 Alcance 2 Alcance 3	↓ Tasa de consumo combustible ↑ Uso de electricidad ↓ Tasa de consumo combustible
Hidrógeno verde	Alcance 1 Alcance 3	↓ Tasa de consumo combustible ↓ Tasa de consumo combustible
Operaciones más eficientes	Alcance 3	↓ Tasa de consumo insumos
Energías renovables	Alcance 2	↓ Factor de emisión matriz energética
Eficiencia energética Mina Rajo	Alcance 1 Alcance 3	↓ Tasa de consumo combustible ↓ Tasa de consumo combustible
Eficiencia energética concentradora	Alcance 2	↓ Tasa de consumo energía eléctrica
Tecnologías en fundiciones	Alcance 1 Alcance 2 Alcance 3	↓ Tasa de consumo combustible ↓ Tasa de consumo energía eléctrica ↓ Tasa de consumo combustible y energía
COVID19	Alcance 3	↓ Viajes personal/teletrabajo (categoría 7)

Al comparar todas las iniciativas que impactan el BaU, gráficamente se tiene lo siguiente:

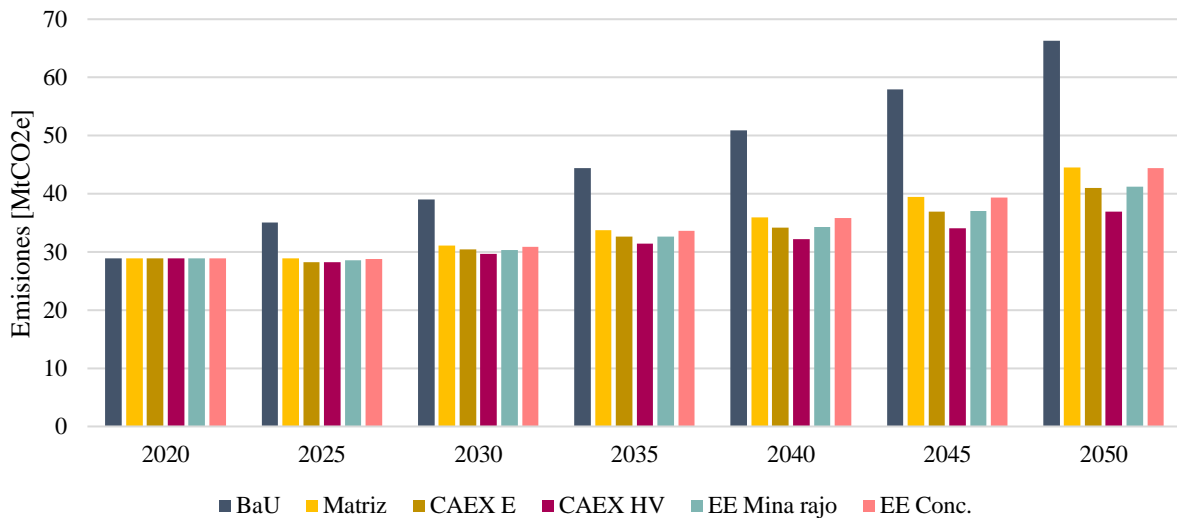


Figura 52: Comparación de iniciativas y tecnologías.

Como se ve en la Figura 52, en el largo plazo, la tecnología que permite una mayor reducción de las emisiones corresponde al hidrógeno verde utilizado en los camiones puesto que esto además considera el cambio en la matriz energética. Sin embargo, esto no ocurre en todo el periodo, sino

que empieza a tomar mayor relevancia desde el periodo 2040, esto ocurre por la tasa de incorporación de esta tecnología, lo que significa que, si se quiere una reducción más agresiva, la velocidad de incorporación tiene que ser mucho mayor. Al comparar con el BaU, el cambio en la matriz energética es la que tiene una mayor reducción de emisiones, que al 2050 se traducen en una reducción del 33%. Al comparar el resto de las iniciativas contra el cambio en la matriz, la incorporación de camiones con HV son los que generan un mayor impacto en la mitigación, logrando una disminución del 17%, seguido por los camiones eléctricos con un 8% y la eficiencia energética de la mina rajo con un 7%.

Considerando todas las iniciativas cuantificadas, se selecciona una combinación de ellas que permiten una disminución en las emisiones en el largo plazo obteniendo lo siguiente:

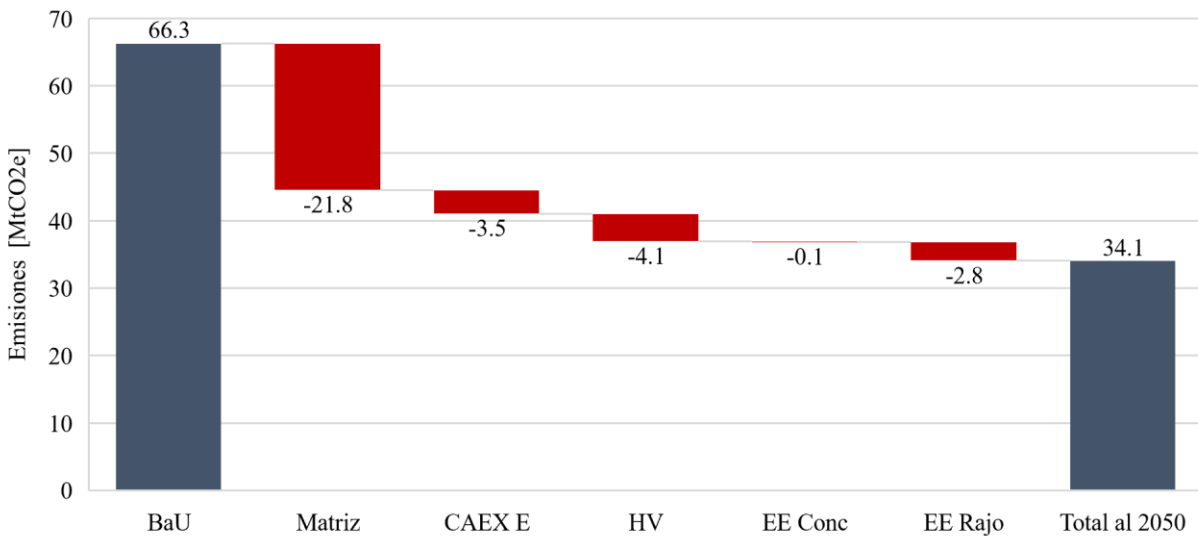


Figura 53: Impacto iniciativas/tecnologías total de emisiones al 2050.

Como se ve en la Figura 53, el cambio en la matriz energética es lo que genera un mayor impacto en la reducción de emisiones en el largo plazo con una disminución del 33% de las emisiones totales con respecto al escenario BaU. Lo sigue la incorporación de camiones a hidrógeno verde con una disminución de 4.1 MtCO₂e que equivale a un 6%, la incorporación de camiones eléctricos con una disminución de 3.5 MtCO₂e, mientras que la eficiencia energética en dos procesos críticos disminuye en conjunto un 4.4% de las emisiones. Esto indica que al 2050 la industria reduciría sus emisiones a un 51.4% obteniendo 34.1 MtCO₂e.

Cuando solo se ve el impacto de estas tecnologías/iniciativas del alcance 1 y 2, que son aquellos que la industria está considerando cuando hablan de carbono neutralidad, se tiene lo siguiente:

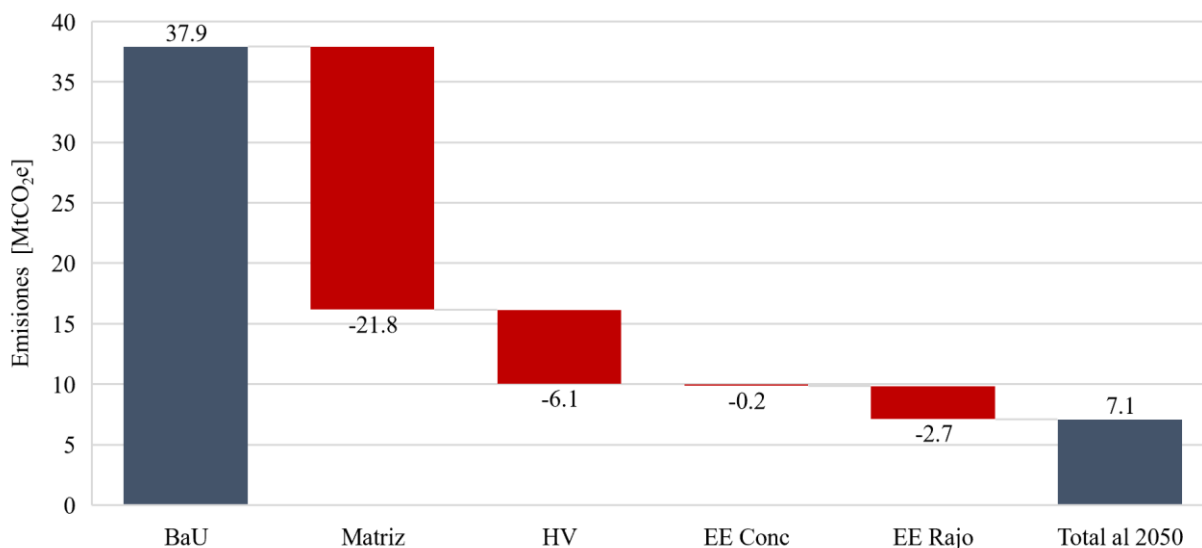


Figura 54: Impacto iniciativas/tecnologías emisiones alcance 1 y 2 al 2050.

Las emisiones en el largo plazo tienen una reducción mucho mayor. Disminuyendo a un 19% del total llegando así a 7.1 MtCO₂e. En este escenario el cambio en la matriz energética tiene un rol preponderante en la descarbonización de la industria con una disminución del 57% de las emisiones, esto evidencia la gran dependencia que tiene el sector en los planes de descarbonización de la matriz para llegar a la anhelada carbono neutralidad. Seguido por la incorporación de camiones con celdas de hidrógeno verde que disminuyen las emisiones en un 16%, y la eficiencia energética tanto de la concentradora como de la mina rajo disminuyen las emisiones en un 7.7% como se ve en la Figura 54.

Como se puede ver de los últimos gráficos, es importante que las operaciones, compañías, y la industria tenga planes de descarbonización flexibles, considerando más de una iniciativa y/o tecnología, ya que la alta dependencia de una particular, que podría no estar disponible aún en el periodo estipulado, podría poner en riesgo la descarbonización tanto del sector minero como del país.

4.8 METAS DE LA INDUSTRIA

En conjunto con el Consejo Minero, las grandes empresas de la industria minera han publicado sus metas de reducción de emisiones en el mediano y largo plazo y estas se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 27: Metas de reducción de emisiones gran minería del cobre en Chile.

Empresa	Alcance 1	Alcance 2	Alcance 3	Total	Carbono neutralidad
Anglo American	-	-	-	30% al 2030 (respecto al 2016)	2040
Antofagasta Minerals	30% al 2025 (respecto al 2020)	30% al 2025 (respecto al 2020)	-	-	2050

Barrick	-	-	-	10% al 2030 (respecto al 2019)	-
BHP	-	-	-	70% al 2050 (respecto al 2020)	2050
Caserones	-	100% al 2021	-	-	-
Codelco	-	-	-	70% al 2030 (respecto al 2019)	-
Candelaria	-	80% al 2023	-	-	-
Collahuasi	-	100% al 2020	-	-	2040 (solo alcances 1 y 2)
Freeport McMoran	-	100% al 2021 (respecto al 2018)	-	-	-
Glencore	-	-	-	40% al 2035 (respecto al 2019)	2050
KHGM	-	100% al 2023	-	-	-
Rio Tinto	-	-	-	15% al 2030 (respecto al 2050)	2050
Teck	33% al 2030* (respecto al 2019)	33% al 2030* (respecto al 2019)	-	-	2050

Elaboración propia con información de (Consejo Minero, 2021b).

* Reducción en la intensidad de emisiones.

Como se ve en la Tabla 27, 7 de las 13 empresas asociadas al Consejo Minero esperan llegar a la carbono neutralidad al 2040 o 2050, sin embargo, no todas detallan si consideran todos los alcances o solo alcance 1 y 2. Con respecto al alcance 1, solo 2 de estas tienen alguna meta al final de esta década, muy probablemente porque saben que se requiere de un quiebre tecnológico importante para utilizar tecnologías más agresivas en la reducción de emisiones directas. Sobre el alcance 2, las empresas son más disruptivas, sin embargo, se debe a que estas tienen asegurados contratos de energías limpias con las generadoras. Ninguna de las empresas consideradas tiene metas relacionadas a la disminución del alcance 3, muy probablemente porque no todas han identificado, cuantificado y reportado estas emisiones y porque no hay instrucciones y/o normativas claras para la mitigación de estas.

Con lo anterior, se hace complejo confiar en que al 2040-2050 estas empresas van a contar con carbono neutralidad si es que no hay compromisos serios y disruptivos en torno a la reducción de emisiones. Y da cuenta, una vez más, de que es necesario que las empresas cuenten con planes de reducción de emisiones flexibles para disminuir la dependencia en una o dos tecnologías que aún no tienen la madurez necesaria para poder ser incorporadas en los planes estratégicos del sector.

En esta línea, es crucial que el Estado, como gran impulsor de políticas públicas, sea capaz de trabajar planes estratégicos en el corto, mediano y largo plazo para poder guiar los esfuerzos de la industria en materia de descarbonización y carbono neutralidad. Asimismo, tener planes diferenciados y de apoyo a la pequeña y mediana minería, puesto que los recursos y dimensiones con respecto a la gran minería son muy distintos.

Es fundamental que las normativas para la industria estén a la altura de las exigencias actuales. Por lo que se hace necesario el fortalecimiento de la institucionalidad para poder fiscalizar planes de descarbonización, así como darles seguimiento y una actualización periódica a dichos planes en función de los cambios que la sociedad y el mercado puedan generar.

Se requieren leyes que sean capaces de promover y fortalecer el desarrollo de proveedores locales, así como mayor inversión en investigación, desarrollo e innovación para el progreso de tecnologías que permitan tener una industria minera más responsable con sus externalidades negativas.

5. CONCLUSIONES

De acuerdo con lo expuesto en las páginas previas y los objetivos esperados del trabajo de tesis, se puede concluir que las emisiones tanto de alcance 1, 2 y 3 pueden ser parametrizadas en función de variables conocidas por la industria minera del cobre en Chile. Además, con la metodología desarrollada es posible cuantificar y analizar el comportamiento de estas en el largo plazo.

Las emisiones de gases de efecto invernadero deberían ser variables críticas en la toma de decisiones de las empresas mineras de tal forma de generar productos responsables con el entorno y la sociedad, asegurando además su licencia para operar y agregando valor a sus productos.

Uno de los resultados más importantes corresponde a la participación de cada uno de los alcances en el total. Ya que se tiene que el alcance 1 es responsable del 19% de las emisiones, mientras que el alcance 2 del 33% y el alcance 3 del 48%. En los últimos años, el mayor énfasis de mitigación lo han tenido las emisiones de alcance 2, en donde se han generado iniciativas para mejorar la eficiencia energética y se han promovido los contratos con 100% energía renovable. Esto último, si se llegase a tener un factor de emisión diferenciado, podría llevar las emisiones de alcance 2 a cero. Situación que tiene tres puntos a destacar: i) las operaciones que tengan la liquidez suficiente para optar a estos contratos serán capaces de eliminar sus emisiones indirectas de alcance 2, mientras aquellas que no, tendrán un producto con mayor huella, ii) eliminar las emisiones de alcance 2 revela el foco a la mitigación de las emisiones de alcance 1 y 3, y iii) al eliminar las emisiones de alcance 2, iniciativas como las eficiencia energética ya no tienen un foco medioambiental, sino que de excelencia operacional.

Es importante considerar que solo se estudian 6 categorías del *GHG Protocol*, se dejan fuera categorías que podrían ser significantes en la cuantificación, así que el número total de emisiones podría ser mayor, e incluso, el alcance 3 podría ser responsable de más del 48% según lo obtenido en este trabajo. En esta misma línea, en el mediano plazo, una gestión responsable de las emisiones durante la vida de una mina debería considerar la identificación y cuantificación de las emisiones de alcance 3 de los bienes capitales y obras civiles para llevar a cabo el proyecto, que, si bien se instalan una vez o se renuevan en periodos largos de tiempo, son intensivos en uso de materiales que podrían estar aportando de forma significativa a este alcance.

Cuantificar alcances 1, 2 y 3 permite repensar la selección de proveedores y gestionar la cadena de suministros en pro de la disminución de emisiones. Esto podría traducirse en potenciar tecnologías y proveedores nacionales por sobre internacionales.

Otro de los resultados a destacar corresponde a los procesos críticos. Se tiene que para el alcance 1, el proceso crítico es la mina rajo con el uso de CAEX para el transporte del material, si a este se la suman las emisiones de alcance 2, la mina rajo es responsable del 16% de las emisiones totales y se transforma además, en un procesos crítico global con la tercera posición en cuanto a participación. Para el alcance 2 se tiene como proceso crítico la concentración, si a este se le suman las emisiones de alcance 1, es responsable del 17% del total de emisiones, teniendo la segunda posición en cuanto a participación global. Finalmente, las categorías críticas del alcance 3 corresponde a la adquisición de insumos con un 19% del total, y el desplazamiento de personal con un 10% de las emisiones totales.

La gestión de los procesos y etapas mencionadas previamente, son críticas para la gestión y reducción de las emisiones de la industria minera del cobre. Tanto las iniciativas de la industria como las políticas públicas deberían estar enfocadas en ellas.

Considerando las emisiones obtenidas del cátodo pirometalúrgico producido en Chile versus el producido en China, si solo se considera la variable ambiental en términos de emisiones, y teniendo en cuenta que la reducción de emisiones es una problemática global, conviene tener fundiciones en Chile. Estas tienen que contar con tecnologías limpias y con una planificación que vaya de la mano con las personas y el medioambiente.

Las tecnologías e iniciativas impulsadas deberían estar enfocadas en: i) el desarrollo de proveedores locales o regionales que tengan una producción responsable, ii) mejor tecnología y mayor innovación en los procesos de molienda, iii) menor dependencia de combustibles fósiles en los equipos de transporte de mineral, iv) tecnologías eficientes energéticamente en los procesos de hidrometalurgia y/o uso directo de energías renovables, v) incorporación de buses eléctricos en el transporte de personal, así como minimización de viajes aéreos de trabajadores, y vi) menor dependencia de combustibles fósiles en equipos de transporte marítimo así como mayor agregación de valor en los productos finales comercializados.

El supuesto de tener operaciones mineras más eficientes producto de tener tasas de consumo menores es relevante en la gestión de la operación y en el mejoramiento continuo de esta. Adicional a esta alternativa, es relevante considerar insumos más limpios, es decir, que tengan un menor impacto en su producción, así se estarían reduciendo las emisiones producto de menos materiales generados, pero además estos tendrían un factor de emisión menor que ayudarían a reducir las emisiones de alcance 3 de una operación minera.

Chile, como el principal productor de cobre del mundo, debería poner esfuerzos en generar una herramienta que permita estandarizar la medición de emisiones de alcance 3 en las compañías, homogeneizando la metodología y el tratamiento de datos, de esta forma, todas las operaciones podrían considerar las mismas categorías y el límite de batería.

Adicionalmente, se identifica que la industria manufacturera juega un rol importante en la reducción de las emisiones. En primer lugar, porque es uno de los sectores que puede acelerar la descarbonización de la industria minera. Vemos por ejemplo que empresas como BMW ofrecen a sus clientes productos cada vez más conscientes con el medioambiente, pero esto implica que la cadena de valor, y por lo tanto el cobre y otros metales que utilizan para manufactura tengan una extracción y un procesamiento responsable. Otras empresas, como Apple, se comprometen no solo a tener productos carbono neutrales al 2030, sino que también que la cadena de valor para la generación de esos productos sea carbono neutral. Si bien esto representa un tremendo desafío para la industria minera debido a los altos niveles de emisión que se generan, también es un catalizador importante para lograr sus metas de descarbonización y así tener una industria más competitiva.

La descarbonización de la industria considerando toda la cadena de valor no depende solo de una tecnología o iniciativa, es una combinación de estas la que entrega el mejor escenario como se demuestra en las secciones previas. Además, estas tecnologías tienen distinta madurez, necesidad de capitales de distinta magnitud y tiempos de implementación diferentes. Dicho esto, se requiere una priorización de estas tecnologías e iniciativas considerando un análisis multivariable en donde indicadores de sustentabilidad tengan una ponderación importante. Esta jerarquización

debería facilitar y justificar la toma de decisiones de las compañías en la gestión de sus emisiones, y podría ser un insumo de interés para apoyar lineamientos de políticas públicas asociada a la impulsión de estas.

Para que Chile y sus compañías mineras logren las metas de descarbonización al 2050, es necesario que el Estado pueda articular esfuerzos colaborativos, incluyendo públicos y privados, y pueda generar un marco de acción para el sector. Este plan debe incluir el fortalecimiento de la institucionalidad, la impulsión de proveedores locales con mayor inversión en innovación y capital humano, la priorización de tecnologías e iniciativas que permitan empujar una industria minera responsable de su entorno y a la altura de las exigencias de la sociedad.

6. RECOMENDACIONES

Como trabajo futuro de este mismo documento se propone:

- En la proyección se identifican algunas oportunidades de mejora, podrían ajustarse valores del consumo energético por mayor consumo de agua desalada, algo que se espera siga en aumento en la industria producto de la escasez hídrica de las regiones en las que se encuentra. Así como la proporción de productos provenientes de minerales sulfurados y oxidados. Que como se menciona en este documento, por las características de los yacimientos, se espera que aumente la cantidad de sulfuros procesados y disminuya óxidos.
- Para las tecnologías de electromovilidad e hidrógeno verde solo se estudia la incorporación de estas tecnologías en los camiones ya que son los que representan mayor impacto en las emisiones, sin embargo, para un estudio más detallado del real impacto de estas tecnologías, es necesario considerar el impacto en otros equipos utilizados en la industria.
- Estudiar y cuantificar en mayor detalle y cantidad las iniciativas y tecnologías planteadas en el largo plazo para ver cómo se comportan las emisiones. Esto puede ir acompañado de una evaluación económica.
- Priorizar las iniciativas y tecnologías con análisis multicriterio para identificar hacia dónde tienen que ir dirigidos los esfuerzos para descarbonizar la industria, contemplando variables como el tiempo de implementación, los costos capitales y operacionales, y las emisiones reducidas.
- Se recomienda hacer un estudio de emisiones de alcance 1, 2 y 3 solo para fundiciones y refinerías, ya que la cantidad de insumos que se utilizan en estas son distintas a la extracción y producción de cobre, por lo que se hace interesante conocer insumos y procesos críticos de esta particular etapa.
- En el estudio que se presenta no se considera la producción de subproductos, que en Chile tienen una participación importante, por lo que se recomienda la incorporación de estos en estudios futuros.
- Se propone considerar la etapa de exploración minera en el cálculo de las emisiones, ya que es fundamental para llevar a cabo un proyecto minero y se requiere una cantidad de insumos importantes.
- Para estudios futuros, se recomienda extender el LCA a otras categorías de impacto como: agotamiento de ozono, acidificación de los suelos, eutrofización, toxicidad humana, ruido, uso de suelos, entre otros. Esto permitiría tener una visión completa y una gestión responsable de las operaciones y sus emisiones.

BIBLIOGRAFÍA

- Accenture. (2021). *The acceleration of mining transformation, how the pandemic is accelerating mining's workforce transformation*.
- AEC. (2019). *GHG Protocol*. <https://www.aec.es/web/guest/centro-conocimiento/ghg-protocol>
- Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos. (2021). *Descripción general de los gases de efecto invernadero*. <https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/descripcion-general-de-los-gases-de-efecto-invernadero>
- Agencia de Sostenibilidad Energética. (2020). *Medidas de Eficiencia*. <https://www.energiaenmineria.cl/medidas-de-eficiencia/>
- AngloAmerican. (2020). *Scope 3 Emissions Calculation*. April.
- AngloAmerican. (2021). *Reporte de Sustentabilidad 2020*.
- B2B. (2021). *Estudio del hidrógeno verde en Chile y el mundo 2021*.
- BHP. (2019). *Scope 3 Emissions Calculation Methodology*. September, 1–4. https://www.fmg1.com.au/docs/default-source/default-document-library/scope-3-emissions-calculation-methodology_v1.pdf?sfvrsn=6c420765_0
- Biblioteca del Congreso Nacional. (2021, February 13). *Ley 21.305 Sobre Eficiencia Energética*. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1155887>
- Cochilco. (2015a). *Factores clave para el desarrollo de la minería en Chile*.
- Cochilco. (2015b). *Tecnologías en fundiciones de cobre*. Cochilco.
- Cochilco. (2019). *Proyección de la producción de cobre en Chile 2019-2030*.
- Cochilco. (2020a). *Análisis del mercado de insumos críticos en la minería del cobre 2019. Cochilco, 2019*, 1–43. [https://www.cochilco.cl/Mercado de Metales/Analisis Mercado de los Insumos Críticos 2017 \(empresas\).pdf](https://www.cochilco.cl/Mercado de Metales/Analisis Mercado de los Insumos Críticos 2017 (empresas).pdf)
- Cochilco. (2020b). *Anuario de estadísticas del cobre y otros minerales*.
- Cochilco. (2020c). *Informe de actualización del consumo energético de la minería del cobre al año 2019. Comisión Chilena Del Cobre, Ministerio de Minería*, 31. <https://www.cochilco.cl/Mercado de Metales/2017 07 03 Informe de Consumo de Energía 2016.pdf>
- Cochilco. (2021a). *Anuario de estadísticas del cobre y otros minerales*. 90. <https://www.cochilco.cl/Lists/Anuario/Attachments/20/AE2019avance.pdf>
- Cochilco. (2021b). *Estado actual y perspectivas del consumo de energía en la minería del cobre. Comisión Chilena Del Cobre, Ministerio de Minería*.
- Cochilco. (2021c). *Informe de actualización del consumo energético de la minería del cobre al 2020*.

- Cochilco. (2021d). *Reporte Fundición y Refinación*.
- Cochilco. (2022). *Proyección del consumo de energía eléctrica en la minería del cobre 2021-2032*.
- Collahuasi. (2020). *Inventario de emisiones de gases de efecto invernadero: Huella de carbono*.
- Consejo Minero. (2021a). Cifras actualizadas de la minería. *Cifras Actualizadas de La Minería*. <https://consejominero.cl/chile-pais-minero/cifras-actualizadas-de-la-mineria/>
- Consejo Minero. (2021b). *Metas de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero de las empresas de la gran minería del cobre asociadas al Consejo Minero*. 4(1), 1. <https://consejominero.cl/areas-de-trabajo/energia-y-cambio-climatico/>
- Energía, A. (2021). *Factores de Emisión – Energía Abierta | Comisión Nacional de Energía*. <http://energiaabierta.cl/visualizaciones/factor-de-emision-sic-sing/>
- Energía Llama. (2016). *Pampa Elvira — Energía Llama Solar*. <https://ellaimasolar.cl/pampaelvira>
- Generadoras de Chile. (2020). *Generadoras de Chile - Sector minero cuadruplicará el uso de energías renovables al 2023*. <http://generadoras.cl/prensa/sector-minero-cuadruplicara-el-uso-de-energias-renovables-al-2023>
- IUCN. (2017a). *¿Qué son las Soluciones Basadas en la Naturaleza?* <https://www.iucn.org/node/28778>
- IUCN. (2017b). *Infraestructura Natural para la Gestión del Agua*. https://www.iucn.org/sites/dev/files/content/documents/2017/infraestructura_natural_para_la_gestion_del_agua.pdf
- Ministerio de Energía. (2018a). *Pampa Elvira Solar (Faena Minera Gabriela Mistral Codelco) - Autogeneración*. https://autoconsumo.minenergia.cl/?proyector_autoconsumo=pampa-elvira-solar-faena-minera-gabriela-mistral-codelco
- Ministerio de Energía. (2018b). *Ruta energética 2018-2022. Ministerio de Energía Gobierno de Chile*, 90. <http://www.energia.gob.cl/rutaenergetica2018-2022.pdf>
- Ministerio de Energía. (2020a). *Estrategia nacional de hidrógeno verde*. 33.
- Ministerio de Energía. (2020b). *Informe de actualización de antecedentes 2020 Planificación energética de largo plazo*.
- Ministerio de Energía. (2020c). *Plataforma de Electromovilidad - Beneficios de la electromovilidad - Eficiencia Energética*. <https://energia.gob.cl/electromovilidad/introduccion/beneficios-de-la-electromovilidad#arribatitulo>
- Ministerio de Energía. (2022). *Plan Nacional de Eficiencia Energética 2022-2026*.
- Ministerio de Minería. (2021). *Política nacional minera*.
- Ministerio de Minería. (2022). *Minería 2050, Política Nacional Minera*.

- Myhre, G., Shindell, D., Bréon, F.-M., Collins, W., Fuglestvedt, J., Huang, J., Koch, D., Lamarque, J.-F., Mendoza, D. L., Nakajima, T., Robock, A., Stephens, G., Takemura, T., & Zhang, H. (2013). *Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.*
- Nations, U. (1997). *Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change.*
- Oliver, E., Ozment, S., Alfred Gründwalt, Silva, M., & Watson, G. (2021). *Soluciones basadas en la naturaleza en América Latina y el Caribe.* 49. https://files.wri.org/d8/s3fs-public/2021-10/soluciones-basadas-en-la-naturaleza-en-america-latina-y-el-caribe-apoyo-del-banco-interamericano-de-desarrollo.pdf?VersionId=FR18PeKLTUjprifkX._8ge6_HxZFEZnj
- Río Tinto. (2020). *Scope 1, 2 and 3 Emissions Calculation 2020.* 1–21. <https://www.riotinto.com/sustainability/climate-change>
- Rizzo, G., Santis, A., Held, M., & Bachofen, M. (2018). Electrified Drives Efficient and Powerful. *ATZ Offhighway Worldwide*, 11(4), 11–18. <https://doi.org/10.1007/s41321-018-0050-y>
- U.S. EPA. (2020). Direct Emissions from Mobile Combustion Sources. *Climate Leaders GHG Inventory Protocol, December.* http://www.epa.gov/climateleadership/documents/resources/mobilesource_guidance.pdf
- WBCSD, & WRI. (2012). A Corporate Accounting and Reporting Standard. *Greenhouse Gas Protocol*, 116.
- WBCSD, & WRI. (2013). *Technical Guidance for Calculating Scope 3 Emissions* (Vol. 148, Issue Scope 3).
- WRS. (2014). GHG Protocol Scope 2 Guidance. *Greenhouse Gas Protocol, March*, 118. https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/Scope 2 Guidance_Final_Sept26.pdf
- WWF. (2017). *¿En qué consisten las soluciones basadas en la naturaleza y cómo pueden ayudarnos a enfrentar la crisis climática?* <https://www.worldwildlife.org/descubre-wwf/historias/en-que-consisten-las-soluciones-basadas-en-la-naturaleza-y-como-pueden-ayudarnos-a-enfrentar-la-crisis-climatica>

ANEXOS

Anexo A Caracterización grupos

Tabla 28: Caracterización grupos.

	G1	G2	G3	G4	G5
Ubicación de la faena	I R	II R	II R	III R	RM
Método de explotación	Rajo	Rajo	Rajo	Rajo	Subte
Material movido [Mt/año]	100.9	65.2	262.6	43.0	52.5
Material procesado [Mt/año]	50.4	21.7	65.6	14.3	52.5
Días trabajados anuales	360	360	360	360	360
Procesamiento	Hidro	Hidro	Piro	Piro	Piro
Producción cátodos [tmf/año]	219,400	94,500	0	0	0
Producción concentrado [tmf/año]	0	0	378,133	86,367	339,733
País de exportación principal de cátodos	China	China	N/A	N/A	N/A
País de exportación principal de concentrado	N/A	N/A	China	China	China
N° trabajadores/as	1,000	500	2,000	500	2,000
N° de contratistas en la faena	3,000	2,000	4,000	2,000	4,000
Fundición y Refinería	Nacional	Nacional	China	China	China
Razón estéril mineral (REM)	2	3	4	3	1
Ponderación	11%	23%	39%	9%	18%

Anexo B Distribución emisiones insumos

Tabla 29: Distribución de emisiones insumos, alcance 3.

Insumo	Emisiones [tCO ₂ e]	Participación [%]
Ácido sulfúrico	1,647,326	21.6%
Bolas de molienda	1,725,209	22.7%
Cal	822,775	10.8%
Colectores	95,999	1.3%
Combustible	1,374,809	18.1%
Depresantes de pirita	192,996	2.5%
Espumantes	26,224	0.3%
Explosivos	1,250,913	16.4%
Extractantes	7,751	0.1%
Floculantes	19,300	0.3%
Lubricantes	105,440	1.4%
Neumáticos	176,046	2.3%
Revestimientos de molinos	166,256	2.2%

Anexo C Factores de emisión

País	Factor de emisión [kgCO ₂ e/kWh]	Fuente
Alemania	0.3387	Carbon Footprint. 2022. 2021 Grid Electricity Emissions Factors
Brasil	0.0617	Carbon Footprint. 2022. 2021 Grid Electricity Emissions Factors
Chile	0.4056	Ministerio de Energía, Gobierno de Chile. Energía Abierta. Factores de Emisión SEN
China	0.6000	Quanli Wu, Chenyang Peng. 2016 Scenario Analysis of Carbon Emissions of China's Electric Power Industry Up to 2030.
Corea (República)	0.4156	Carbon Footprint. 2022. 2021 Grid Electricity Emissions Factors
España	0.1710	Carbon Footprint. 2022. 2021 Grid Electricity Emissions Factors
Estados Unidos	0.4239	Carbon Footprint. 2022. 2021 Grid Electricity Emissions Factors
Japón	0.4658	Carbon Footprint. 2022. 2021 Grid Electricity Emissions Factors
Perú	0.4521	Carbon Footprint. 2022. 2021 Grid Electricity Emissions Factors

Anexo D Proyección ley de cobre largo plazo

Para construir el gráfico se usan los datos de (Cochilco, 2020b) hasta el 2019. Se estudia una curva que se ajuste a los datos históricos y a la proyección resultando ser una potencia con las características que se muestran en el gráfico.

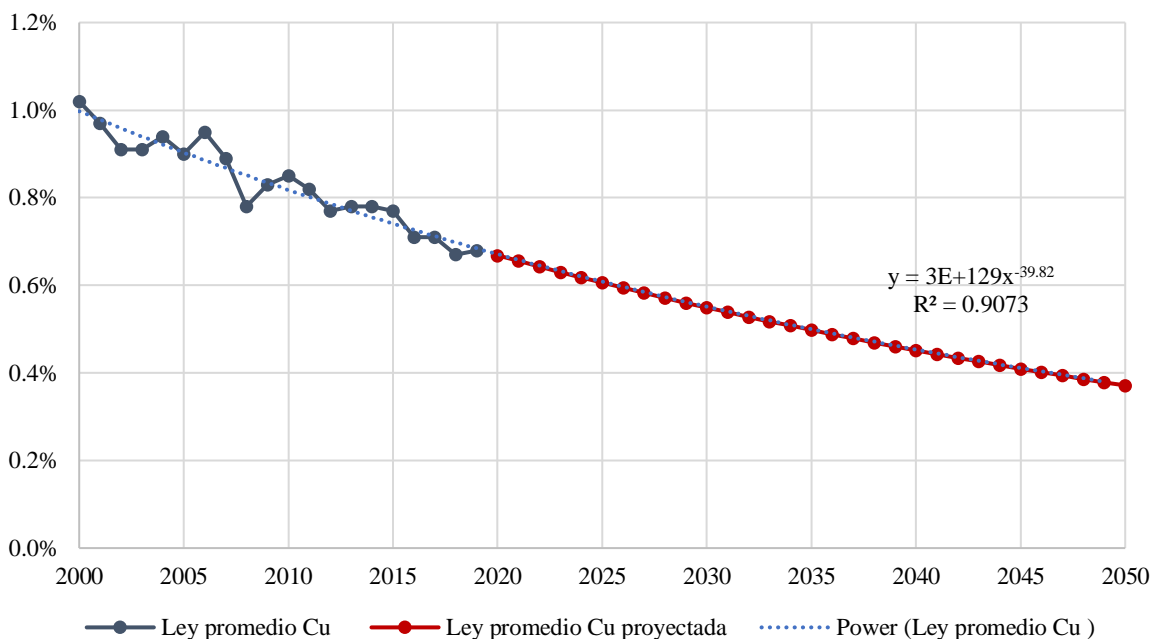


Figura 55: Proyección ley de Cu al 2050.

Anexo E Proyección generación eléctrica en Chile

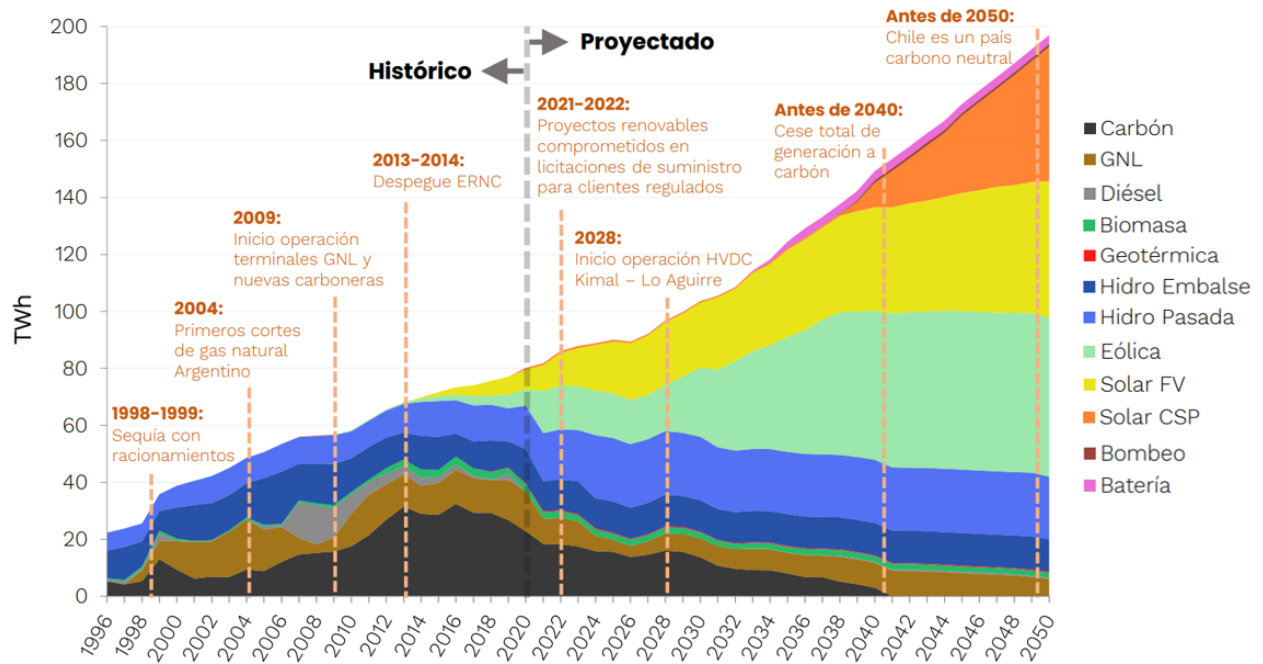


Figura 56: Registro y proyección de la generación eléctrica en Chile Ministerio de Energía, 2020b.