

Síntesis Ejecutiva

MINERÍA Y CAMBIO CLIMÁTICO



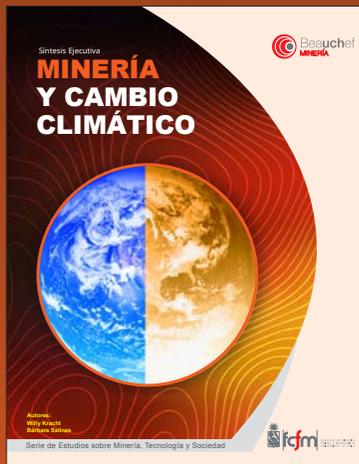
Autores:
Willy Kracht
Bárbara Salinas

Serie de Estudios sobre Minería, Tecnología y Sociedad



fcfm

FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE



MINERÍA Y CAMBIO CLIMÁTICO

“Síntesis Ejecutiva”

Estudio completo se encuentra disponible en:
www.beauchefmineria.cl

Comité Editorial:

Patricio Meller
Javier Ruiz del Solar
Gabriela Novoa

Colaboradores:

Rodrigo Palma
Leandro Voisin
Brian Townley
Humberto Estay
Williams Calderón
Paulina Ramírez
Melanie Colet
José Miguel Cardemil
Miguel Lagos
Germán Aguilar
Santiago Montserrat
Rodrigo Jiliberto
Óscar Landerretche
Patricio Meller
James McPhee

contacto@beauchefmineria.cl

<http://www.beauchefmineria.cl/>

Av. Beauchef 850, Santiago, Chile

Producción gráfica:

<http://www.publisiga.cl/>

Impresión: B&B Impresores

Marzo 2021



Contenido

PRÓLOGO	4
INTRODUCCIÓN	6
I. Minería y Cambio Climático	8
La lucha contra el cambio climático: un desafío de carácter global	8
El desempeño de Chile frente al cambio climático	10
La vulnerabilidad de Chile ante el cambio climático	11
Minería y emisiones de carbono	13
Minerales estratégicos para el desarrollo de energías limpias	15
II. Hacia una minería baja en emisiones	20
Emisiones de la minería chilena	21
Eficiencia energética para reducir las emisiones de CO ₂	24
Litio: un dilema entre huella de carbono y huella hídrica	25
Ventajas comparativas para el desarrollo de energía solar en Chile	26
Minería y energía solar: sinergias importantes entre ambos sectores	27
Geotermia: una fuente de energía limpia y disponible 24/7	30
Electromovilidad: una solución para reducir las emisiones directas de la minería	31
Motores a hidrógeno para los grandes camiones de la minería	33
III. Adaptación al Cambio Climático	34
Vulnerabilidad de la minería frente al cambio climático	35
La minería chilena y la adaptación	39
IV. Propuestas para lograr una minería baja en emisiones	40
Rutas de acción para la minería chilena	41
Un escenario ambicioso para la minería chilena	42
Desarrollo de las energías renovables y la electromovilidad	44
Economía circular en minería: una forma inteligente de usar los recursos	47
Cobre responsable: las ventajas de Chile para su desarrollo	50
Colaboración entre el sector privado, sector público y la academia	51
El rol de la academia	51
La transformación como enfoque de políticas públicas	52
Referencias	54



Prólogo



La minería en Chile enfrenta un escenario complejo y sin precedentes, producto del cambio climático y otras problemáticas ambientales. Esto impone importantes desafíos de mitigación y adaptación, sobre todo para la minería del cobre, debido a que, al ser un metal clave para el desarrollo de tecnologías limpias, su demanda experimentará un incremento a nivel global.

“Minería y Cambio Climático” aborda—de manera fundamentada y concreta— este desafío, proponiendo una primera ruta de transformación para la minería. El trabajo, fundado en un gran número de referencias,

ofrece una mirada actualizada de estadísticas del sector, tendencias, vulnerabilidades frente al cambio climático y demandas proyectadas para distintos minerales.

Con un diagnóstico claro, este estudio analiza las opciones concretas de las que la minería en Chile dispone para reducir sus emisiones directas e indirectas. La eficiencia energética, a diferencia de lo planteado usualmente, se presenta como una opción con gran potencial, mientras se generen los incentivos adecuados y haya mayor conocimiento respecto a su implementación. Por otro lado, el documento abraza la oportunidad única de la energía solar



en sus diversas formas, sin dejar de lado los aportes de otras energías renovables, la electromovilidad y el hidrógeno como portador energético. Todo este análisis se realiza considerando los impactos que podría eventualmente tener el desarrollo de estas tecnologías a nivel local, donde se destaca el “dilema del litio” como una disyuntiva no resuelta entre huella de carbono y huella hídrica.

Por otra parte, se releva la necesidad de trabajar en forma acelerada en temas de adaptación, donde comparativamente se ha avanzado menos y los riesgos son crecientes, sobre todo para la minería, que es particularmente vulnerable al cambio climático.

Con todos estos insumos, el documento culmina en forma propositiva describiendo estrategias de acción que abarcan la cultura sectorial, el horizonte temporal, las opciones tecnológicas y las políticas públicas requeridas.

Sin duda, este estudio es una generosa contribución y una invitación para que todos los actores, ya sea la academia, el sector privado, el sector público y/o la sociedad en general, sumen esfuerzos para enfrentar la transformación que requiere nuestra minería, y sector productivo en general, para cumplir con la meta de reducción de emisiones que Chile se comprometió a alcanzar con el acuerdo de París. Todo esto como parte de un esfuerzo colaborativo global para mantener el calentamiento global bajo 1,5°C y así asegurar a nuestras futuras generaciones una calidad de vida razonable en nuestro planeta.

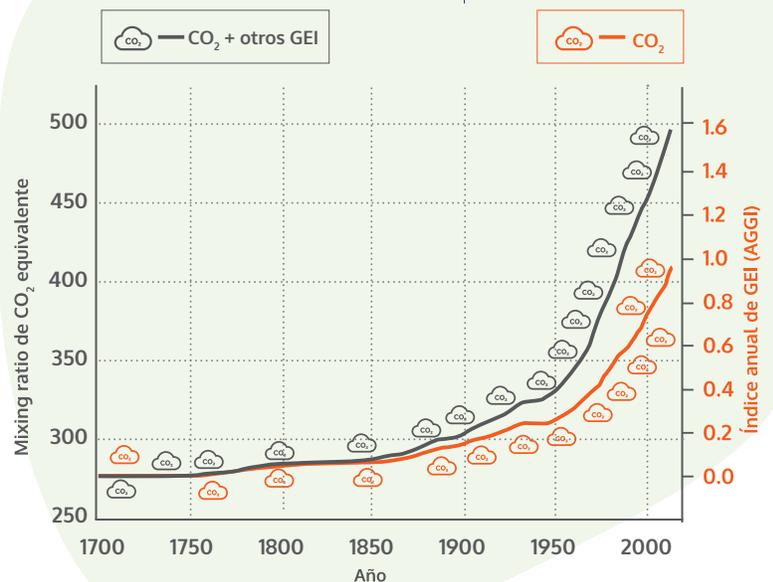
Rodrigo Palma Behnke
Profesor, Departamento de Ingeniería Eléctrica
Director, Centro de Energía
Universidad de Chile



Introducción

En la actualidad, se han alcanzado los mayores niveles de CO₂ en la atmósfera desde la existencia del ser humano. Las concentraciones promedio, que solían ser de 280 ppm (partes por millón) en la época preindustrial, alcanzaron un récord de 415 ppm en mayo de 2019 (National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), 2019). Este aumento se debe principalmente a la actividad humana y es producido en su mayoría por la quema de combustibles fósiles (IPCC, 2013), cuyo origen se explica por los requerimientos energéticos de los avances tecnológicos ocurridos en las revoluciones industriales y luego se ha intensificado debido al aumento exponencial del consumo de bienes y servicios. En la figura 1 se aprecia este incremento, donde la línea naranja muestra las concentraciones de CO₂ y la línea negra corresponde a la suma del CO₂ más otros Gases de Efecto Invernadero (GEI).

Figura 1:
Cambios en los niveles de abundancia de carbono equivalente (1700-2020)



Fuente: Adaptado de NOAA (2019)

La presencia de estos gases en nuestra atmósfera no permite que el planeta pueda llevar a cabo su ciclo de enfriamiento natural, provocando aumentos de temperatura. Este fenómeno, denominado “calentamiento global”, se ha transformado en uno de los principales desafíos para la humanidad debido a los efectos devastadores que puede llegar a tener en nuestro planeta.

Para enfrentar el cambio climático se han definido dos líneas de acción: la mitigación¹ y la adaptación. La primera busca atacar las causas del problema a través de la reducción de las emisiones de GEI para limitar el aumento de temperatura, mientras que la segunda apunta a prepararnos mejor para las consecuencias inevitables que deberemos enfrentar.



Fuentes de generación energética que no se consumen ni agotan.

Uno de los principales desafíos que enfrentamos para avanzar en la mitigación, es la transformación energética—que se basa en la utilización de Energías Renovables No Convencionales (ERNC)—y la electromovilidad. Ambas propuestas necesitan grandes cantidades de metales y minerales para poder materializarse, por lo que se proyecta un incremento importante de la demanda por materias primas a 2050 (Banco Mundial, 2019) y, en consecuencia, la minería jugará un rol importante en este escenario.

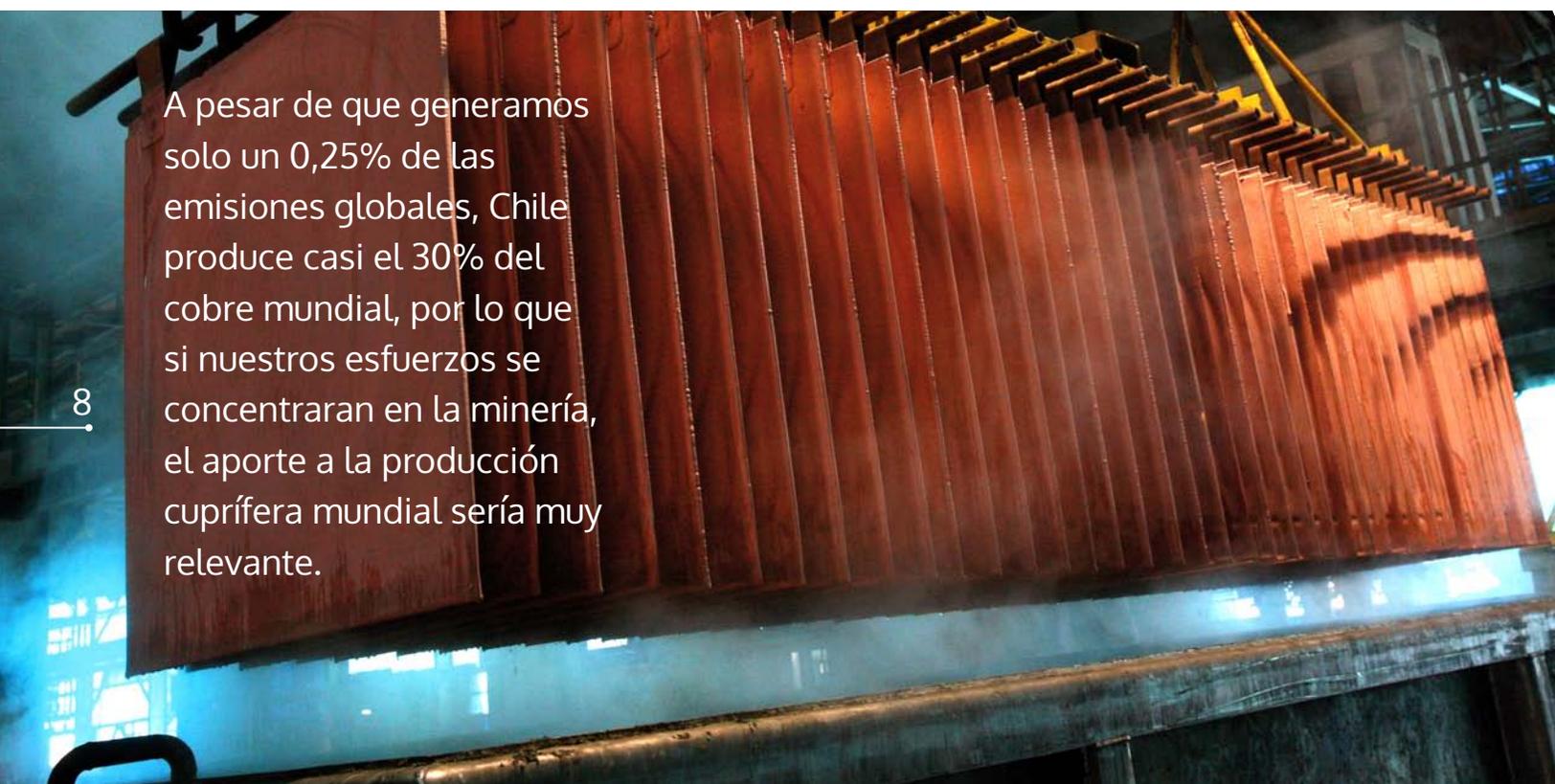
Dada la importancia de la actividad minera en este proceso de transformación energética, esta debiese prepararse para enfrentar los impactos negativos que tendrá el cambio climático en sus operaciones. Por lo tanto, la adaptación es fundamental si queremos tener la oferta de materiales que nos permita generar las tecnologías necesarias para limitar el calentamiento global.

Adicionalmente, visto que el cobre es un metal clave para el desarrollo de tecnologías limpias, es poco razonable mantener un sistema productivo minero que no se haga cargo de sus propias emisiones de GEI, lo que a su vez tiene un efecto en el cambio climático. Es decir, lo lógico sería que las materias primas necesarias para la transformación energética sean extraídas de la forma más sustentable posible.

Ante esta problemática surge el interés por llevar a cabo el presente estudio, el cual busca desarrollar, desde una perspectiva amplia, el tema de minería y cambio climático. Uno de los propósitos principales es proponer una ruta de transformación de la minería que apunte a la reducción de emisiones, tanto directas como indirectas. Para esto, hemos considerado la opinión de diversos académicos e investigadores de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas (FCFM) de la Universidad de Chile, con el objetivo de entregar una propuesta desde la academia.

¹ En este estudio se abordará solo la reducción de emisiones y no la captación de CO₂ ya existente en la atmósfera.

I. Minería y cambio climático

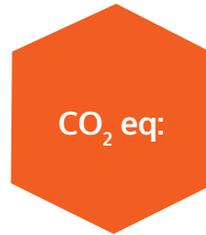
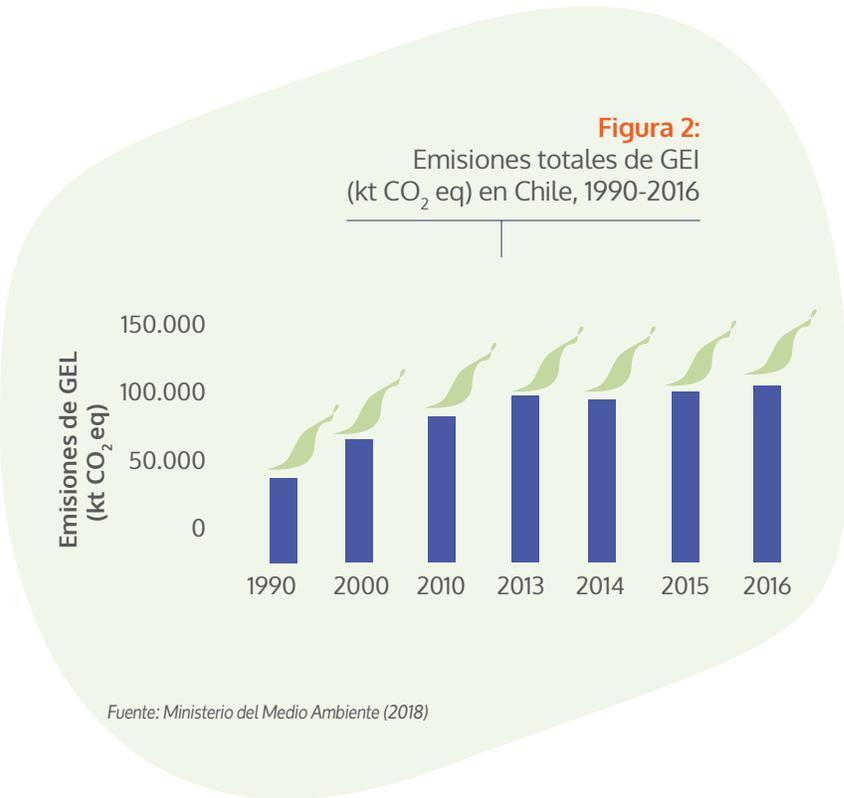


8. A pesar de que generamos solo un 0,25% de las emisiones globales, Chile produce casi el 30% del cobre mundial, por lo que si nuestros esfuerzos se concentraran en la minería, el aporte a la producción cuprífera mundial sería muy relevante.

La lucha contra el cambio climático: un desafío de carácter global

Las concentraciones de CO₂ en la atmósfera crecen cada año (NOAA, 2019). Por esto, en la COP 21² se firmó el Acuerdo de París, cuyo principal objetivo es mantener “el aumento de la temperatura global en este siglo por debajo de los 2°C con respecto a los niveles preindustriales y proseguir con los esfuerzos para limitar aún más el aumento de la temperatura a 1,5°C” (ONU, 2019). Chile firmó este acuerdo, lo que sin duda nos obliga a realizar grandes esfuerzos.

² Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, realizada en 2015 en París, Francia.



Corresponde a un volumen de GEI equivalente a una tonelada de CO₂.

Las emisiones chilenas también han aumentado, sumando 111.678 kt CO₂ eq³ en el 2016⁴ (figura 2). A pesar de que generamos solo un 0,25% de las emisiones globales, Chile produce casi el 30% del cobre mundial, por lo que si nuestros esfuerzos se concentraran en la minería, el aporte a la producción cuprífera mundial sería muy relevante. Es decir, aunque la contribución de Chile sea insignificante para el calentamiento global, somos un agente relevante para que la minería se transforme en una industria más sustentable.

Por otro lado, los países considerados como pequeños contribuidores suman alrededor de un 25% del total de emisiones, por lo que si todos empiezan a asumir que son insignificantes y no cooperan se vuelve un problema. Además, nos enfrentamos a un fenómeno de carácter global, lo que implica que debe ser tratado de forma colaborativa. La importancia

de esto ha quedado en evidencia con la crisis de la pandemia de COVID-19, donde no hacer nada o tomar medidas de forma tardía nos perjudica a todos. En el caso del calentamiento global enfrentamos un desafío similar: si queremos limitar el aumento de temperaturas tenemos que colaborar.

La urgencia del Acuerdo de París se debe a que el carbono permanece mucho tiempo en la atmósfera, por lo que se va acumulando a través del tiempo. En base a esto, nace el concepto de “presupuesto de carbono”, que corresponde a una forma de medir las emisiones adicionales que pueden entrar en la atmósfera si queremos limitar el calentamiento global a cierta temperatura. El IPCC⁵ ha determinado que para cumplir con el objetivo de limitar este aumento a 1,5 grados, el presupuesto que nos queda es de solo 420 Gigatoneladas de CO₂ (GtCO₂) (Rogelj et al., 2018). Esto quiere decir

³ Corresponde al total de emisiones de GEI, pero no se consideran las emisiones absorbidas. El balance entre la sumatoria de los gases emitidos y los absorbidos corresponde a 46.185 kt CO₂ eq.

⁴ Último año documentado.

⁵ IPCC: Panel Intergubernamental del Cambio Climático. Viene del acrónimo en inglés de Intergovernmental Panel on Climate Change. Es el organismo de las Naciones Unidas encargado de evaluar los conocimientos científicos respecto al cambio climático.

que si continuamos emitiendo de la misma forma, se estima que en 7 años agotaremos este presupuesto (MCC, 2020). Si la meta fuesen los 2 grados, esto se alcanzaría en 25 años.

Es decir, tenemos que lograr la neutralidad de carbono sí o sí. Lo que variará será la fecha, que a su vez dependerá de la meta que nos fijemos. Para limitar el aumento a 1,5°C, al 2030 deberíamos haber reducido las emisiones globales en un 45% en relación al año 2010 y alcanzar la neutralidad en carbono a 2050 (IPCC, 2018).

El desempeño de Chile frente al cambio climático

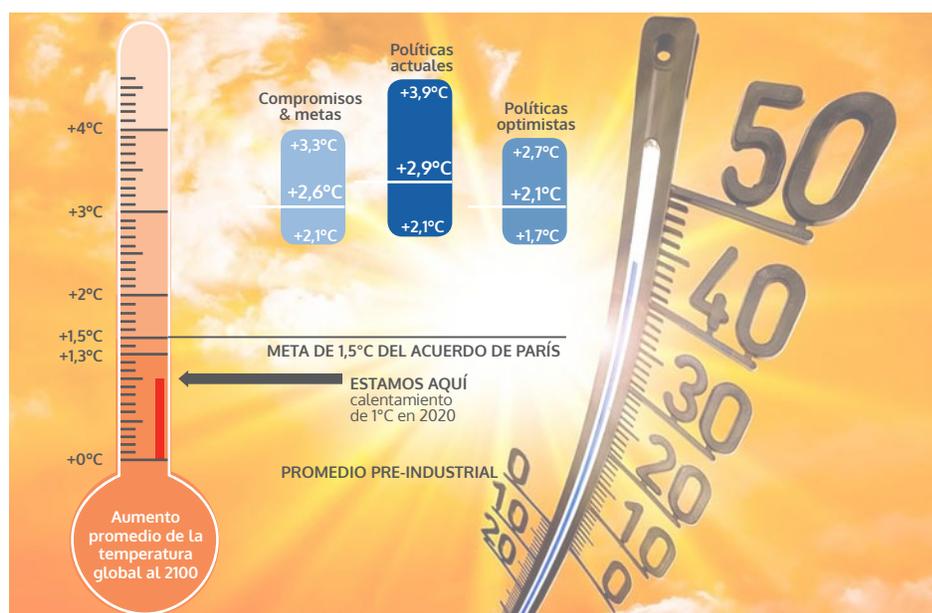
A pesar de que Chile se ha comprometido a ser carbono neutral a 2050, como lo exige el Acuerdo de París, en el ranking que evalúa la eficacia de los compromisos somos considerados "insuficientes" (Climate Action Tracker, 2021b).

Para limitar el aumento a 1,5°C, al 2030 deberíamos haber reducido las emisiones globales en un 45% en relación al año 2010 y alcanzar la neutralidad en carbono a 2050 (IPCC, 2018).

A pesar de que Chile se ha comprometido a ser carbono neutral a 2050, como lo exige el Acuerdo de París, en el ranking que evalúa la eficacia de los compromisos somos considerados "insuficientes" (Climate Action Tracker, 2021b).

Figura 3:

Proyecciones de calentamiento para el año 2100



Fuente: Adaptado de Climate Action Tracker, (2021a)

NDC:

Compromisos voluntarios firmados por los países miembros de la Conferencia de las Partes con el objetivo de reducir los GEI.

Esto significa que si todos estuviesen en esta categoría la temperatura aumentaría entre 2°C y 3°C. Por otro lado, si todos los países cumplen con las metas de reducción de carbono que se han propuesto, las cuales se denominan Contribuciones Nacionales Determinadas (NDC), es probable que alcancemos los 2,6°C, por lo que estas deben ser mucho más ambiciosas si queremos limitar el aumento de temperatura a 1,5°C.

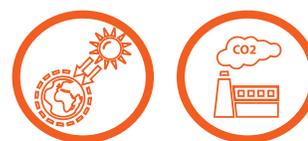
El IPCC ha demostrado que existe una importante diferencia entre un aumento de 1,5°C versus 2°C, por lo que debemos hacer lo posible para no superar los 1,5°C⁶.

La vulnerabilidad de Chile ante el cambio climático

Chile cumple con 7 de las 9 características definidas por el IPCC para determinar la vulnerabilidad de los países: zonas costeras bajas, ecosistemas de montaña, áreas propensas a desastres naturales, ecosistemas frágiles, espacios proclives al deterioro forestal, territorios expuestos a sequías y desertificación y zonas urbanas altamente contaminadas (Center for Climate and Resilience Research, 2018). En el *Global Climate Risk Index* (Kreft et al., 2017), un ranking que identifica los países más afectados por los eventos climáticos extremos, en 2015 ocupamos el décimo lugar.

Tan solo en 2019 Chile experimentó uno de los 3 años más secos del último siglo; 7 tornados en la zona centro y sur; intensas precipitaciones en la Patagonia y el Altiplano, causando pérdidas humanas e infraestructura; olas de calor en la zona central e incendios forestales (Center for Climate and Resilience Research, 2020).

El impacto que tendrá el cambio climático en nuestro territorio variará según la región y el sector económico. En la figura 4 se aprecia la proyección de estos impactos, donde se muestra que enfrentaremos incrementos de temperatura, sobre todo en el norte del país; aumento de la intensidad de las precipitaciones en algunas zonas y disminución en otras. Estas dos variables, el aumento de temperaturas y los cambios en las precipitaciones, son capaces de desencadenar diversos desastres ambientales que podrían afectar enormemente la calidad de vida de nuestra población y perjudicar nuestra economía. Algunos de estos se explican a continuación⁷:



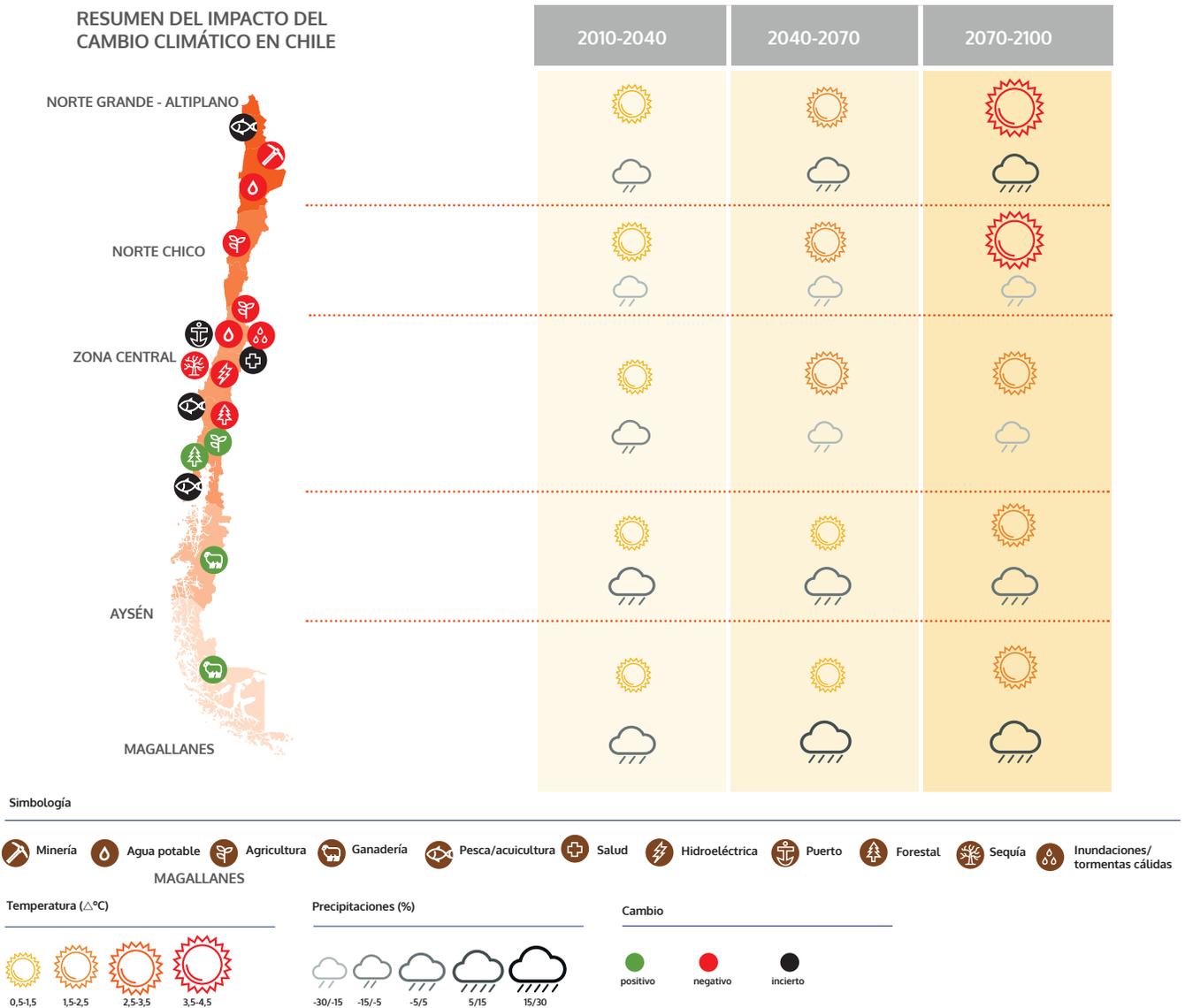
Tan solo en 2019 Chile experimentó uno de los 3 años más secos del último siglo; 7 tornados en la zona centro y sur; intensas precipitaciones en la Patagonia y el Altiplano, causando pérdidas humanas e infraestructura; olas de calor en la zona central e incendios forestales (Center for Climate and Resilience Research, 2020).

⁶ Las diferencias entre alcanzar los 1,5 y los 2°C se detallan en la versión extendida de este documento.

⁷ El detalle de cómo estos eventos afectan directamente a la minería será analizado en el capítulo 3.

Figura 4:

Proyección de impactos del cambio climático por región y sector económico



Fuente: CEPAL (2012)

- **Aumento en el nivel del mar:** pese a que el aumento del nivel del mar no será el principal efecto del cambio climático que afectará a Chile⁸, no está exento de sufrir alteraciones en las marejadas o crecidas que posiblemente dañarían la infraestructura costera y las ciudades y los pueblos ubicados en la costa.
- **Sequías:** impactan directamente al sector agrícola, forestal y a la minería. A pesar de que los primeros dos se ven mucho más afectados, la minería, sobre todo la ubicada en la zona central, podría verse muy perjudicada. Además, es posible que la escasez de agua afecte la producción de energía hidroeléctrica y genere problemas en el suministro de electricidad.

⁸ El aumento del nivel del mar no es homogéneo; en nuestra región no ha aumentado tanto como en otras partes. Además, Chile posee costas elevadas, a diferencia de muchas islas que están a pocos metros sobre el nivel del mar que podrían llegar incluso a desaparecer.

- **Aumento de precipitaciones en zonas altiplánicas:** puede generar aluviones desastrosos para las comunidades y las industrias ubicadas en esos territorios. Numerosos aluviones han ocurrido en el norte de nuestro país en el último siglo, sin embargo, el más catastrófico se registró en 2015, tanto por magnitud del fenómeno como por el daño provocado (Vargas, et al., 2018). Ese año, el norte de Chile enfrentó las peores lluvias de los últimos 80 años, que provocaron la muerte de 26 personas, 120 desaparecidos, casi 30.000 damnificados e importantes pérdidas económicas, afectando principalmente a la minería.
- **Desertificación:** la desertificación está llegando a Santiago, dado que las condiciones climáticas avanzan en dirección sur a 500 metros al año aproximadamente (El Mercurio, 2019). Esto puede afectar la seguridad alimentaria y traer consecuencias catastróficas para la economía.

Minería y emisiones de carbono

En Chile, el sector energía es responsable del 78% de las emisiones de GEI, lo que corresponde a 87.136 kt CO₂ eq (Ministerio del Medio Ambiente, 2018).

El sector minero es intensivo en el uso de energía, situación que empeorará, debido a que los yacimientos se encuentran cada vez más profundos, con leyes decrecientes y con mayor dureza de la roca, por lo que el consumo energético aumentará (Fundación Chile, 2016). Además, las minas a rajo abierto se irán profundizando, requiriendo mover más material estéril por tonelada de material tratado y a una mayor distancia, aumentando el uso de diésel. Otro factor que elevará el consumo energético es la desalinización.



Se proyecta, además, un crecimiento de la industria minera, lo cual aumentaría el consumo de electricidad en un 41,2% al 2029 (figura 5).

Para ordenar la discusión, es importante destacar que las industrias son responsables de tres tipos de emisiones. Como se aprecia en la figura 6, estas se pueden clasificar en *emisiones de alcance 1* (directas), que en el caso de la minería corresponden a la quema de combustibles fósiles; *emisiones de alcance 2* (indirectas), que son las que se generan en la producción de la electricidad que consume el sector; y *emisiones de alcance 3*, que consideran al resto de las emisiones indirectas, como las asociadas a los insumos, proveedores y de los procesos posteriores a que el cobre salga de la planta.

La minería es intensiva tanto en emisiones directas como indirectas; demanda un 33% de la electricidad y casi un 20% del diésel nacional

La minería es intensiva tanto en emisiones directas como indirectas; demanda un 33% de la electricidad y casi un 20% del diésel nacional (COCHILCO, 2018a).

(COCHILCO, 2018a). Estos consumos dependen mucho del proceso, lo que implica que la reducción de emisiones para cada uno de ellos deba ser enfrentado con soluciones específicas.

Entre los propósitos de este estudio está proponer una ruta de transformación de la minería que apunte a la reducción de emisiones de alcance 1 y 2.

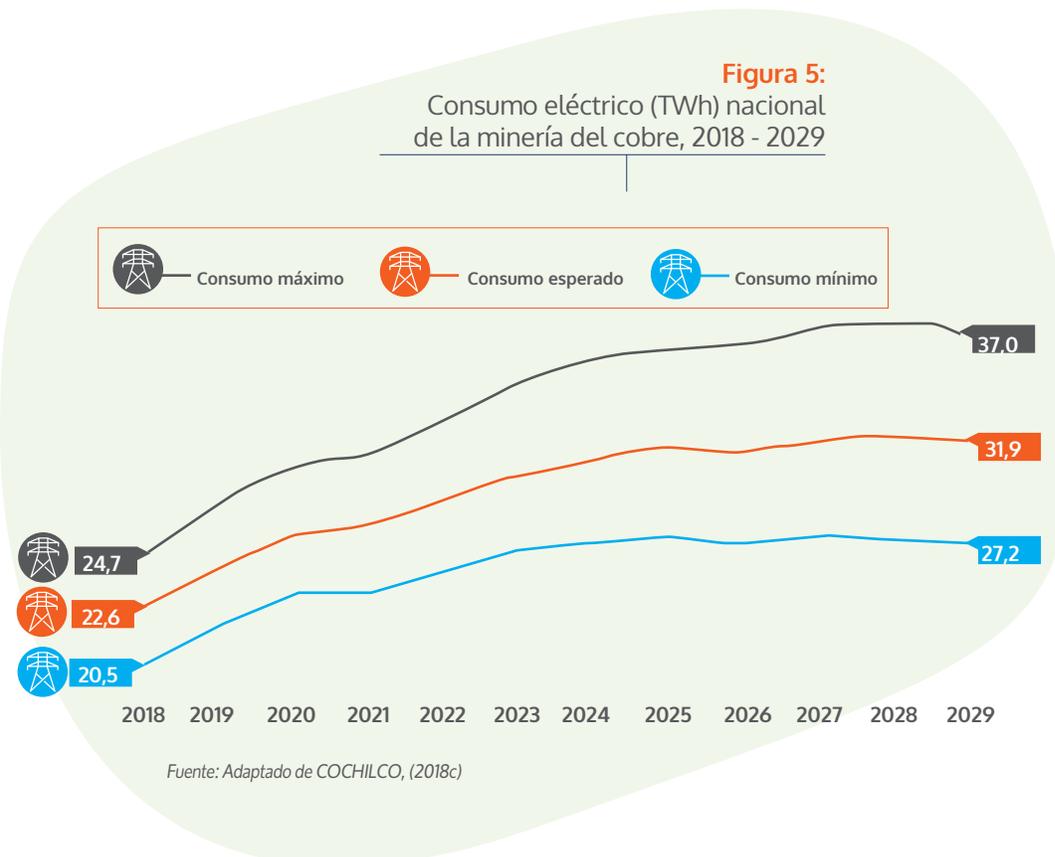
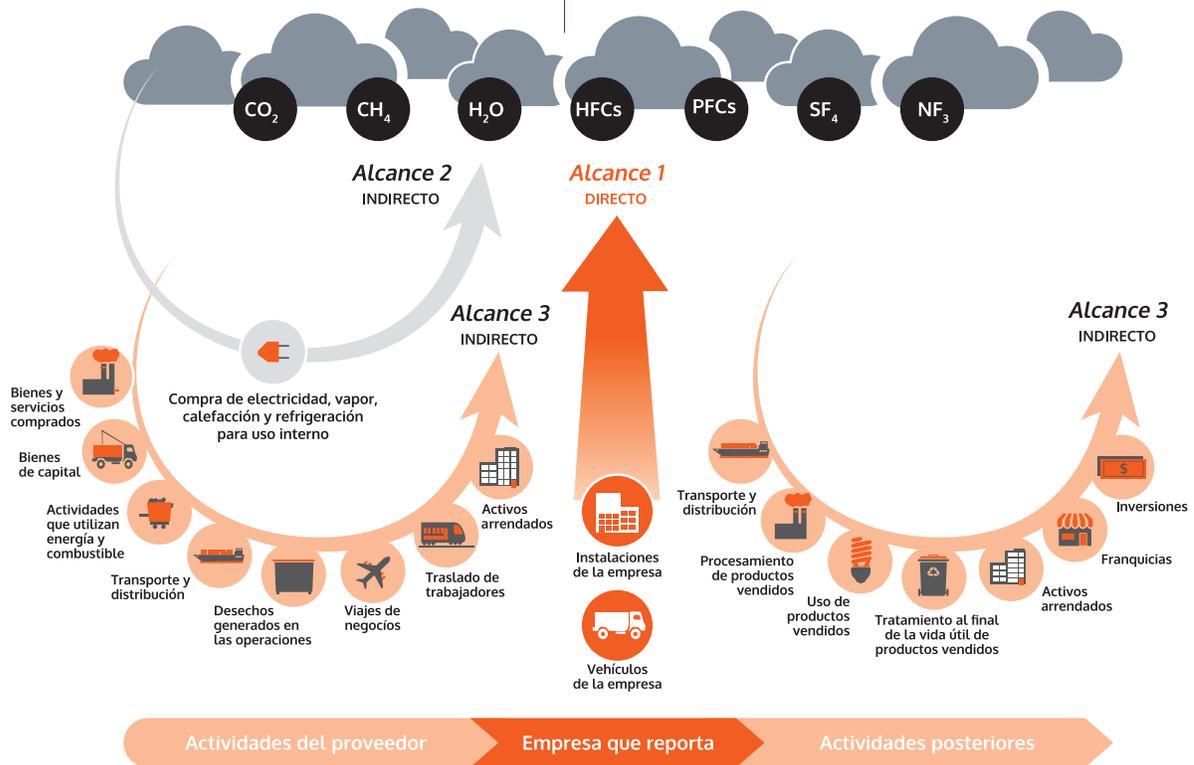


Figura 6:

Tipos de emisiones a lo largo de la cadena de valor



Fuente: Adaptado de World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development (2013)

Minerales estratégicos para el desarrollo de energías limpias

Para cumplir con el Acuerdo de París la transformación energética es ineludible. Si queremos limitar el aumento de temperatura debemos alcanzar la carbono neutralidad al año 2050, para lo cual las principales medidas que se han impulsado son la transformación de la matriz energética y la electromovilidad.

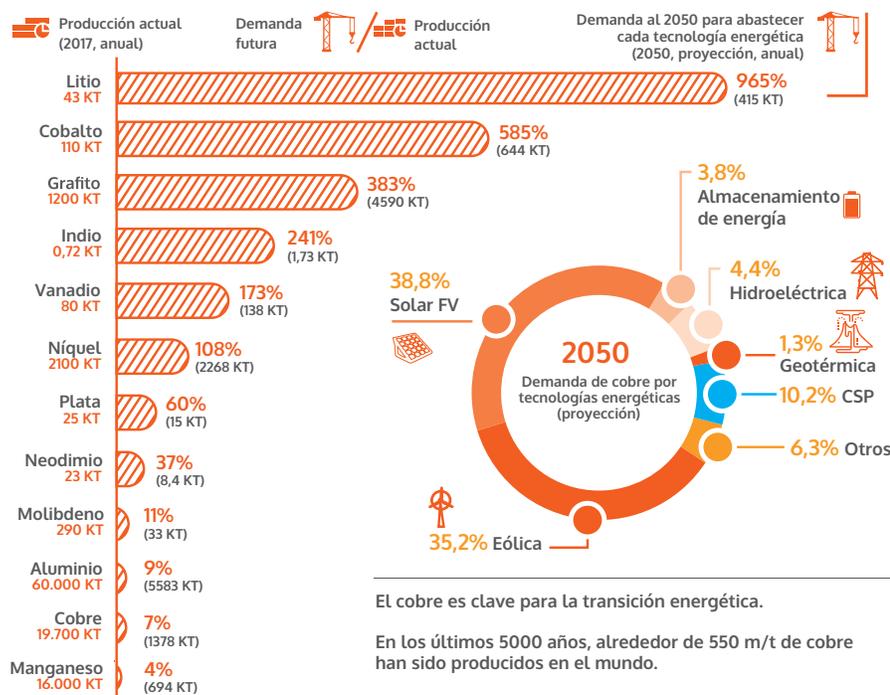
Para cumplir con el Acuerdo de París, la transformación energética es ineludible. Si queremos limitar el aumento de temperatura debemos alcanzar la carbono neutralidad al año 2050, para lo cual las principales medidas que se han impulsado son la transformación de la matriz energética y la electromovilidad⁹. En este contexto, se puede identificar una relación simbiótica entre minería y las ERNC, por la vía de suplir la demanda de insumos minerales que requiere el desarrollo de este tipo de energía. La transición hacia una matriz energética dominada por tecnologías limpias se espera que sea mucho más intensiva en uso de minerales que la generación de electricidad en base a energías fósiles (Hund et al., 2020).

⁹ La industria del transporte es el segundo sector que más contamina a nivel global. La ganadería es también una industria muy contaminante. Genera cerca del 15% de las emisiones globales emitidas por el ser humano, superando levemente a las emisiones de todo el sistema de transporte global (FAO, 2016).

Por otro lado, la creciente oferta de las ERNC representa una oportunidad para la transformación de la minería chilena hacia una industria de bajas emisiones. Por tanto, Chile cuenta con importantes ventajas para impulsar una minería sostenible.

En la figura 7 se aprecia la producción actual global de los elementos estratégicos para esta transformación energética y la demanda anual proyectada al 2050.

Figura 7:
Demanda de elementos estratégicos para la transición energética



El cobre es clave para la transición energética.

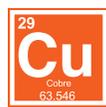
En los últimos 5000 años, alrededor de 550 m/t de cobre han sido producidos en el mundo.

El mundo necesitará casi la misma cantidad de cobre en los próximos 25 años para satisfacer la demanda global.

Fuente: Adaptado de Banco Mundial (2019)

Economía Circular:

Modelo de producción y consumo que busca mantener el valor de los productos, materiales y recursos por el mayor tiempo posible al reintegrarlos en el ciclo de vida del producto al final de su utilización, minimizando así la generación de residuos (Eurostat, 2020).



Cobre

El cobre es esencial para el desarrollo de las ERNC y de vehículos eléctricos, es decir, es un elemento estratégico para la descarbonización. El Banco Mundial afirma que se va a requerir al año 2050 una producción de cobre adicional de 1.378 kTon respecto de 2017 (equivalente a un 7%) solo para satisfacer la demanda de la transformación energética, de los cuales 50% será usado en la energía solar, 35,2% en eólica y el resto en hidroeléctrica, geotermia, baterías y otros (figura 7). Es de-



cir, el 74% de la demanda total de cobre será utilizada para el desarrollo de tecnologías de generación solar y eólica, sin embargo, es probable que esta estimación esté significativamente subestimada, dado que no incluye los requerimientos de infraestructura, como los sistemas de transmisión, ni el crecimiento de la población mundial (Hund et al., 2020). Adicionalmente, la demanda de cobre aumentará por la electromovilidad, en la que se estima un incremento de 4.200 kt al 2050 (Cantallopts, 2019). Por lo tanto, si sumamos ambos efectos, tenemos un incremento de la demanda del cobre de 5.578 kt al 2050 (correspondiente a un 28%), lo que equivale a la producción de Chile. Pero si además consideramos que habrá un aumento asociado a la infraestructura, aparatos electrónicos y otros usos, es razonable estimar que la demanda total aumentará aproximadamente en un 50% al año 2050 (International Copper Association, 2019).

A pesar de que la demanda del cobre no presenta aumentos en términos relativos tan dramáticos en comparación con otros minerales, en términos absolutos su crecimiento es muy importante. Además, el cobre es el único mineral usado en todas las tecnologías consideradas en este estudio del Banco Mundial, por lo que su demanda futura existirá sin importar qué tecnologías se decidan promover para la transformación energética y será la menos afectada ante cambios significantes en el futuro uso de las tecnologías (Hund et al., 2020).

En consecuencia, dado que las tecnologías diseñadas para disminuir las emisiones de CO₂ serán intensivas en cobre, este metal debería ser producido de forma sostenible.

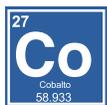


Litio

El litio es necesario para la construcción de baterías, las cuales son esenciales para el almacenamiento de energía en los vehículos eléctricos y en las ERNC.

La demanda de litio crecerá mucho más que la de cobre; se espera un aumento de un 965% al 2050 respecto del 2017 (figura 7). Hay preocupación por la capacidad de satisfacer esta crecida, ya que a pesar de que hay suficientes reservas (Grosjean et al., 2012), existe el riesgo de exceder la capacidad de producción actual (Oliveira, 2017).

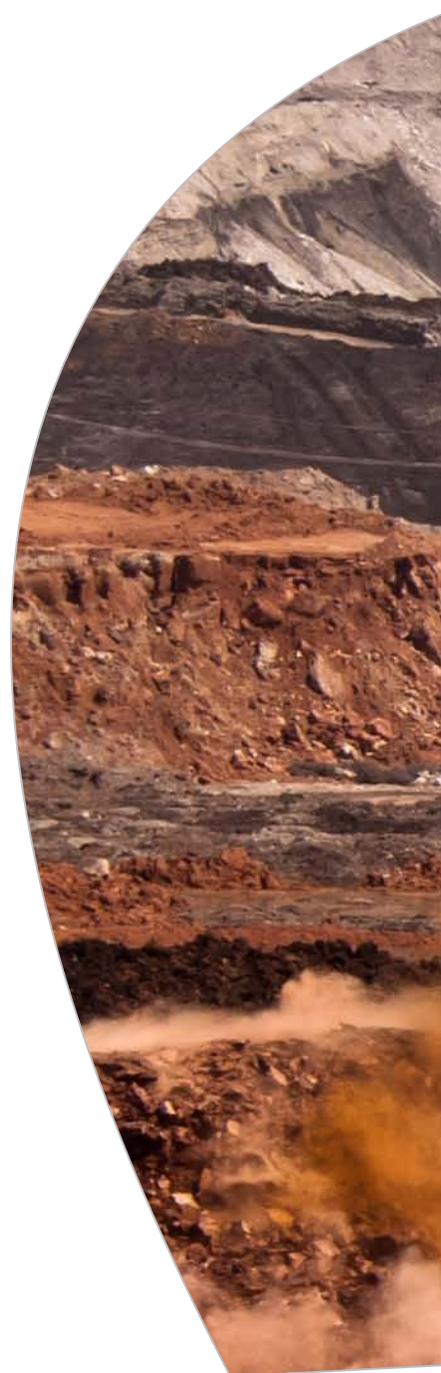
Actualmente, Chile produce el 34% de la oferta mundial de litio, posee un 48% de las reservas y tiene ventajas comparativas gracias a los bajos costos de su extracción (COCHILCO, 2018b). Por esto, es esencial que la industria solucione sus problemáticas ambientales y sociales, de lo contrario, se podría poner en riesgo la oferta mundial de litio. Este tema se abordará de forma más detallada en el siguiente capítulo.



Cobalto

El cobalto es otro elemento estratégico para la generación de baterías. Su oferta debiese crecer en un 585% para poder satisfacer la demanda al 2050 (figura 7).

Brian Townley, académico del Departamento de Geología de la Universidad de Chile estima que nuestro país tiene suficiente cobalto como para desarrollar una pequeña y mediana minería. Según el Prof. Townley, los 4 distritos principales que producían cobalto continuaron sus operaciones, pero actualmente se dedican solo a extraer cobre, por lo que hay un desaprovechamiento de recursos. Además, existe potencial para su recuperación de los relaves, tanto abandonados como activos (Townley et al., 2018).





El cobre es esencial para el desarrollo de las ERNC y de vehículos eléctricos, es decir, es un elemento estratégico para la descarbonización.



Manganeso

El manganeso es otro material estratégico para las baterías. Se estima que su oferta tendría que crecer un 4% para satisfacer la demanda al 2050 (figura 7). Chile solía producirlo, pero las faenas dejaron de operar en 2009 debido, principalmente, a los costos, por lo que no sería difícil volver a impulsar este mercado. Sin embargo, lo anterior dependerá de las condiciones de mercado y su competitividad (Townley et al., 2018).

II. Hacia una minería baja en emisiones



Emisiones de la minería chilena

Las emisiones chilenas se clasifican en cuatro sectores: Energía, Procesos Industriales y Uso de Productos (IPPU), Agricultura, Residuos y Uso de la Tierra, Cambio de Uso de la Tierra y la Silvicultura (UTCUTS)¹⁰. La figura 8 muestra la participación que tiene cada uno de ellos en las emisiones nacionales. Dentro del sector energía, un poco más de un 30% corresponde al transporte, un 42% a la industria de la energía y un 19% a industrias manufactureras y de la construcción. Dentro de esta última categoría se encuentra el sector “minería y cantería”, el cual emitió casi 8 millones de toneladas de CO₂ eq en 2016, es decir, la mitad de las emisiones de esta categoría y un 9% del total del sector energía. Esto considera solo emisiones directas (alcance 1).

Ahora veamos lo que ocurre con la minería del cobre. Como se aprecia en la tabla 1, sus emisiones de alcance 1 en el año 2015¹¹ fueron 5,7 millones de toneladas de CO₂ eq, lo que representa un 5,3% del total de nuestro país, mientras que las de alcance 2 fueron 13,9 millones, equivalente a un 12,8%. Es decir, la minería del cobre es responsable, directa o indirectamente, de un 18,1% de las emisiones de Chile. En esta estimación no están consideradas las emisiones de alcance 3, por lo que el valor total sería aún mayor.

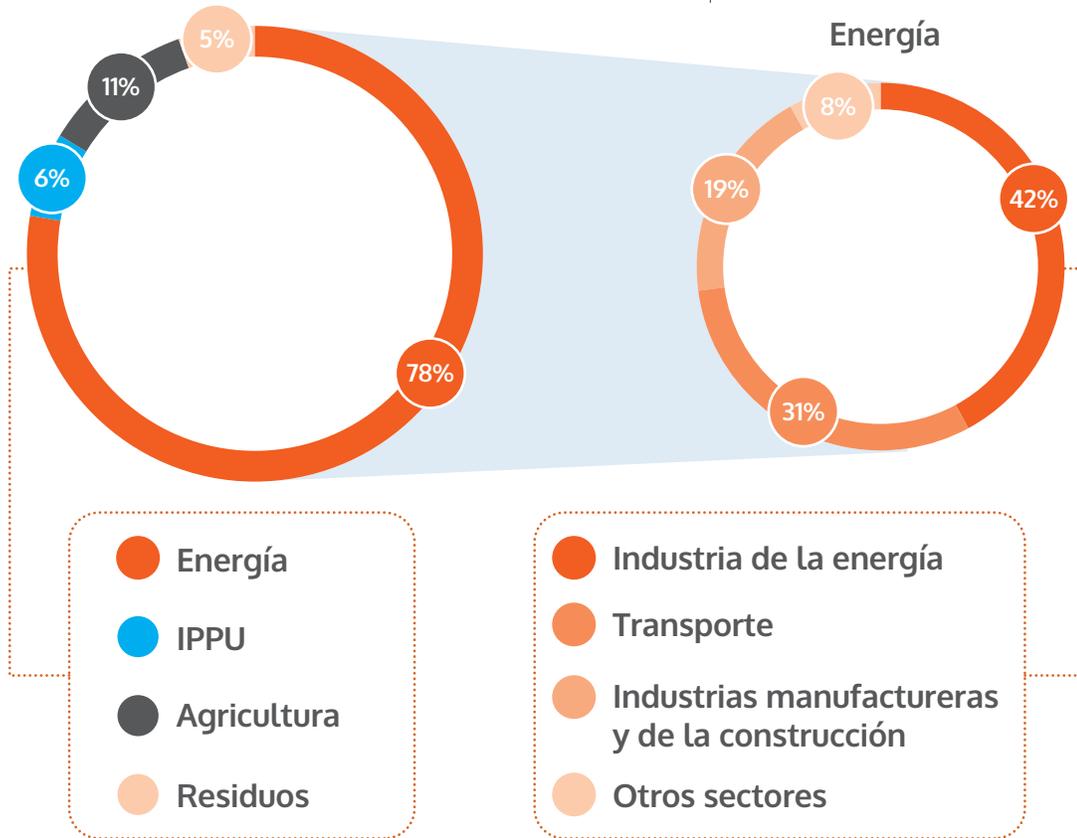
¹⁰ Este sector no se considera en el gráfico, dado que no emite, sino que absorbe CO₂, por lo que no se considera dentro de la totalidad de GEI emitidos a la atmósfera.

¹¹ Último año del cual se publicaron los datos para el sector.



La minería del cobre es responsable, directa o indirectamente, de un 18,1% de las emisiones de Chile.

Figura 8:
Emisiones de GEI (ktCO₂ eq) por sector, 2016



Fuente: Ministerio del Medio Ambiente (2018)



A pesar de que la minería no es la principal responsable de nuestras emisiones, podría ser un ejemplo para otros sectores, como el transporte y la generación de electricidad, dado que es un gran consumidor de energía eléctrica y de diésel a nivel nacional.

Se debe considerar que el consumo energético no se distribuye de forma homogénea a lo largo de la cadena de valor de la producción del cobre. En la figura 9 se puede apreciar el uso de combustible y de electricidad de cada etapa del proceso productivo.

Esto sugiere que existen etapas donde sería más eficiente impulsar un cambio para mejorar el desempeño ambiental del sector. El mayor consumo de diésel ocurre en la mina, principalmente en mina rajo debido al movimiento del material, mientras que el mayor consumo de electricidad ocurre en la concentradora. Sin embargo, las fundiciones tienen el mayor consumo de energía cuando se considera por tonelada de cobre extraído y procesado, concentrándose principalmente en las etapas del refinado a fuego y limpieza de escorias.

A pesar de que la minería no es la principal responsable de nuestras emisiones, podría ser un ejemplo para otros sectores.

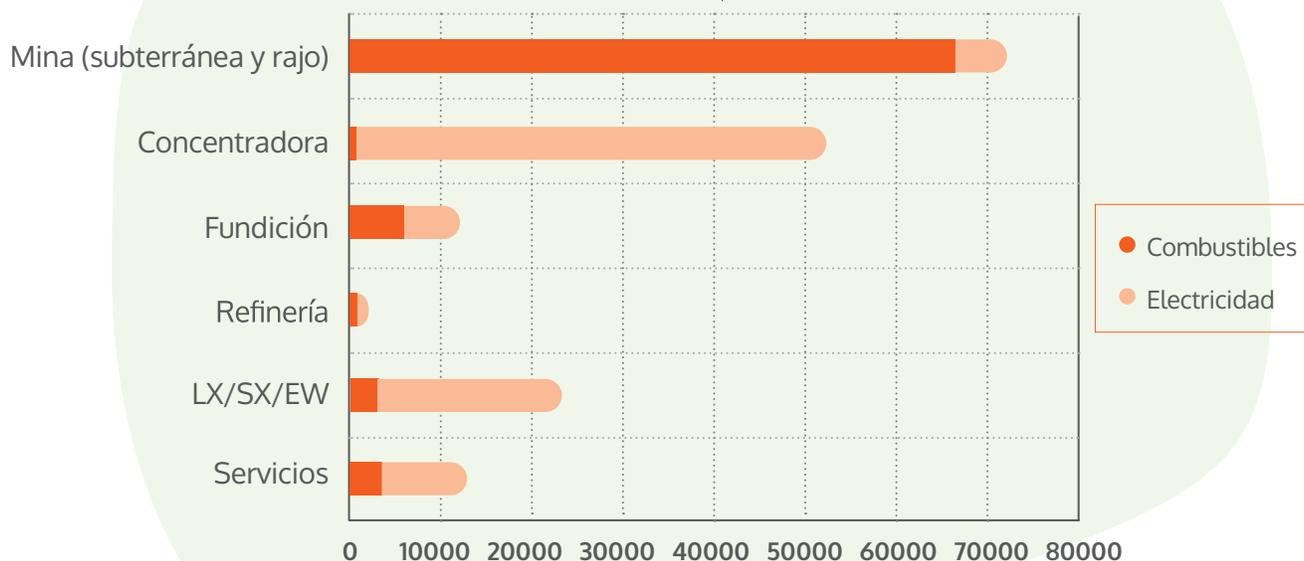


Tabla 1:
Emisiones de CO₂ eq de la industria minera del cobre en Chile, 2015

	Millones de toneladas de CO ₂ eq	Participación en las emisiones totales de Chile
Emisiones directas minería del cobre	5,7	5,3%
Emisiones indirectas minería del cobre	13,9	12,8%
Emisiones totales sector minero (emisiones directas + emisiones indirectas)	19,6	18,1%
Emisiones totales de Chile	108,2	100%

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de COCHILCO (2016a, 2016b) y Ministerio del Medio Ambiente, (2018).

Figura 9:
Consumo nacional de energía de la minería del cobre, 2018
(Terajoule)



Fuente: Elaboración propia a partir de datos obtenidos de COCHILCO (2019a)

Eficiencia energética para reducir las emisiones de CO₂

Pese a que existen diversas propuestas que podrían reducir el consumo energético de la minería, esto no ha sido exitoso en Chile. José Miguel Cardemil, académico del Departamento de Ingeniería Mecánica, relaciona esto a la falta de costumbre que tienen las empresas de medir sus procesos, que a pesar de que muchas tienen todo sensorizado, muy pocas usan esos datos. Esto es una barrera importante, dado que si no se tiene datos fidedignos es difícil implementar medidas (Cardemil).

Otro problema detectado es que muchas veces se requiere adaptar los procesos productivos. Por ejemplo, si un molino SAG (*semi-autogenous grinding mill*) se alimentara con energía solar, se podría alcanzar mayor eficiencia gestionando la demanda energética, procesando

los minerales más duros, es decir, aquellos que requieren más energía, cuando hay sol, lo que permitiría reducir costos en hasta un 10% (Pamparana et al., 2017). Esta estrategia se podría aplicar también al suministro de agua, desalinizándola y bombeándola durante el día (Díaz-Ferrán et al., 2019).

Ante estas propuestas es razonable cuestionarnos por qué no se han implementado si son tan convenientes en cuanto a ahorro energético y mejora de desempeño ambiental. Es cierto que existe un obstáculo asociado a los costos, lo que probablemente desincentivaría a una industria que ya es rentable sin la necesidad de implementar estas alternativas. Por otro lado, si bien estas propuestas pueden ser

eficientes, es posible que implique la revisión de ciertos paradigmas, como la operación a máxima capacidad de tratamiento. La minería opera en base a incentivos asociados a la cantidad de toneladas procesadas/producidas, sin considerar necesariamente el costo energético que ha tenido ese aumento de productividad. Cuando hablamos entonces de operaciones eficientes, en término de consumo de energía y de adaptación para la integración de las ENRC, aparece necesario estar abiertos a discutir paradigmas que han permanecido vigentes por mucho tiempo en la operación minera.

Litio: un dilema entre huella de carbono y huella hídrica

Dado que el aumento de la demanda del litio será impulsado principalmente por el incremento en la producción de baterías que contribuirán a la reducción de emisiones de CO₂, este debiese ser producido de forma sustentable. En Chile, el litio se obtiene a partir de salmuera de salar, la que luego se deposita en piscinas y se deja evaporar para recuperar el litio, además de otros elementos.



Humberto Estay, investigador del Advanced Mining Technology Center (AMTC), comenta que a pesar de que este proceso usa la energía del sol y, por ende, es limpio en término de emisiones, esta energía es usada para evaporar agua en una zona que enfrenta un gran estrés hídrico, por lo que deberíamos considerar la huella hídrica asociada. Según Estay, por cada tonelada de litio extraída se evaporan entre 200 y 1.000 m³ de agua, dependiendo de la concentración de litio contenido en la salmuera. Las comunidades están muy preocupadas por los impactos de esto en la estabilidad hídrica del salar y la escasez de agua, sobre todo porque habitan el ecosistema más árido del mundo (Anlauf, 2015). Además, ya se aprecia una reducción de la vegetación y la humedad del suelo en el Salar de Atacama (Liu et al., 2019).

Entonces, Estay afirma que nos vemos enfrentados a un dilema. Por un lado, es un mineral clave para impulsar la electromovilidad y ERNC, pero a su vez, su explotación puede poner en riesgo los salares de Chile, planteando la interrogante de si podemos solucionar una urgencia medioambiental sin dañar otros ecosistemas. Por lo tanto, tenemos un dilema entre la huella hídrica y la huella de carbono, que a simple vista no es trivial de resolver. Está claro que a nivel local la contaminación *in situ* afecta más a la ciudadanía, como la del agua, aire, etc., sin embargo, a escala global debemos hacernos cargo de nuestras emisiones. Por lo tanto, se sugiere más investigación en este tema para poder comparar los costos y beneficios de cada alternativa y así tomar decisiones informadas respecto a nuestra minería.

Ventajas comparativas para el desarrollo de energía sola en Chile

El norte chileno posee dos factores claves para la generación de una industria solar: altos niveles de radiación y los cielos más despejados del mundo. En consecuencia, existe una oportunidad de desarrollar una industria local.

En el estudio *“Carpe Solem: Solar Mining Opportunities for Chile”*¹² se concluye que bajo un escenario de alto desarrollo de estas tecnologías en Chile, los costos de la energía solar fotovoltaica podrían llegar a los 500 USD/kW al 2030, lo que significaría tener un costo cercano a los 10 USD/MWh, incluso más bajo que las energías fósiles y probablemente el más barato en la historia (Díaz-Ferrán et al., 2019).

“El dilema del litio”: por un lado, es un mineral clave para impulsar la electromovilidad y ERNC, pero a su vez, su explotación puede poner en riesgo los salares de Chile, planteando la interrogante de si podemos solucionar una urgencia medioambiental sin dañar otros ecosistemas (H. Estay).

¹² Estudio realizado por el CE, AMTC, Solar Energy Research Center (SERC) y la Universidad de Stuttgart.

Bajo un escenario de alto desarrollo de estas tecnologías en Chile, los costos de la energía solar fotovoltaica podrían llegar a los 500 USD/kW al 2030, lo que significaría tener un costo cercano a los 10 USD/MWh, incluso más bajo que las energías fósiles (Carpe Solem: Solar Mining Opportunities for Chile, 2019).

Minería y energía solar: sinergias importantes entre ambos sectores

Como ya se mencionó, el cobre es un metal clave para la transformación energética. Dado que será utilizado para desarrollar tecnologías que tienen como objetivo generar energías limpias, es lógico plantear que este sea producido de forma sustentable y que haya una reducción de las emisiones de su proceso productivo.

El consumo de electricidad representa más del 70% de las emisiones de la minería. Dado que el 80% de la energía que consume este sector se concentra en el Desierto de Atacama (CNE, 2018), la energía solar pareciera ser la solución ideal para mejorar su desempeño ambiental. Además, según el estudio recién mencionado, *“Carpe Solem: Solar Mining Opportunities for Chile”*, la energía solar tiene muy bajo potencial de calentamiento global atmosférico (Global Warming Potential, GWP), es silenciosa, usa poca agua, permitiría alcanzar precios bajos de energía, podría ayudar con la desalinización y el bombeo, bajaría las emisiones y tiene potencial para mejorar la relación que tiene la industria con las comunidades.



Uno de los principales aportes de dicho estudio es el análisis del uso de energía solar para diversas etapas del proceso minero. Se indican varios ejemplos, como una combinación de energía fotovoltaica y baterías de almacenamiento, o la implementación de soluciones solares para el manejo de agua, con la consecuente reducción en el consumo de diésel y electricidad. Otro ejemplo es la colocación de paneles solares sobre los relaves, los cuales producirían electricidad mientras evitan la evaporación. Finalmente, se analiza el uso de energía solar para la biolixiviación, ayudando a aumentar la temperatura en faenas ubicadas en sectores cordilleranos que presentan bajas temperaturas, pero altos niveles de radiación.

28

Dado que existen diversas alternativas, surge la interrogante de dónde es más eficiente impulsar la energía solar. En la figura 10 pode-

GWP:

Mide el calor que puede ser atrapado por un GEI en comparación a un gas de referencia (normalmente CO₂).

mos apreciar el GWP de cada etapa del proceso minero, tanto para pirometalurgia como para hidrometalurgia. En las columnas de la izquierda se aprecia el GWP de cada etapa para el año 2014 de acuerdo a la línea de proceso, donde P-Cu corresponde a la ruta de sulfuros: concentración-fundición, mientras que H-Cu corresponde a la ruta de óxidos: LX/SX/EW. A continuación, la figura muestra cómo cambiaría al reemplazar toda la electricidad obtenida del sistema eléctrico por energía solar, donde se ve una clara disminución en prácticamente todas las etapas del proceso, con excepción



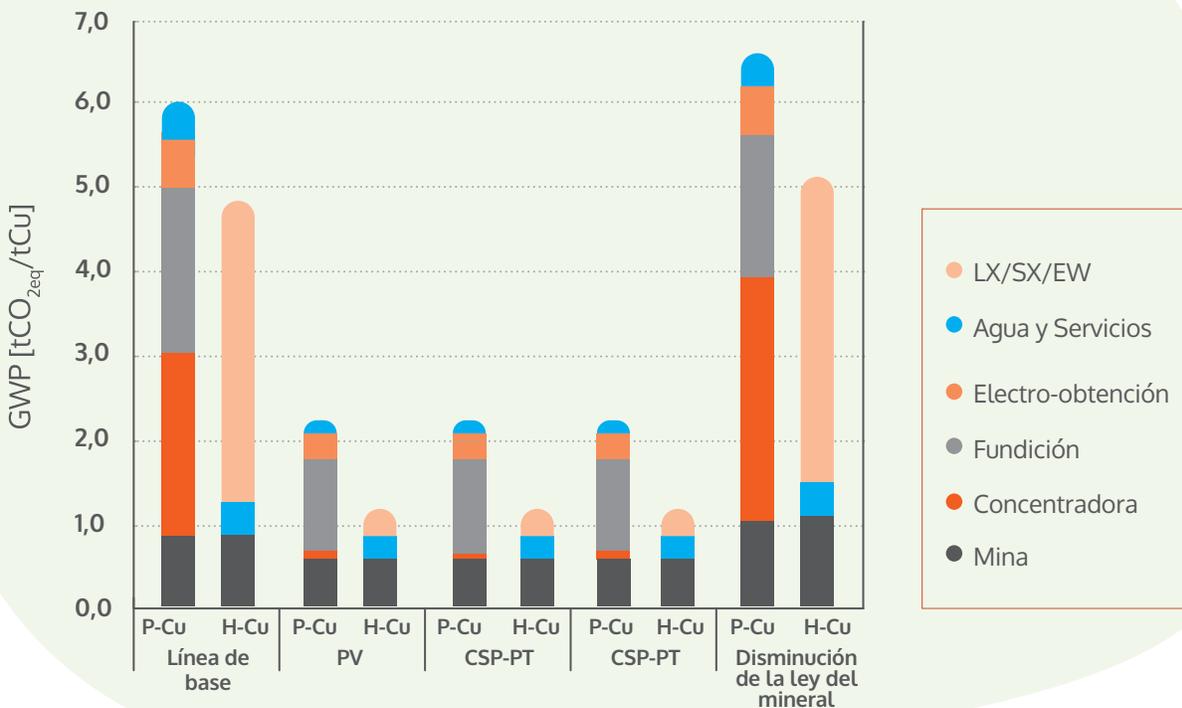
de mina, ya que, como vimos anteriormente, sus emisiones están asociada a la utilización de diésel. Claramente, el mayor impacto de reducción de GWP se obtiene en procesos que son intensivos en uso de energía.

Por otro lado, a pesar de que las fundiciones disminuirían su GWP con la adopción de energía solar, esta mejora no es tan significativa como la que experimentarían otras etapas del proceso productivo. Esto se debe a que existen procesos dentro de las fundiciones que son muy difíciles de alimentar con energía solar. Como complemento, Leandro Voisin, académico del Departamento de Ingeniería de Minas, destaca dos posibles alternativas para disminuir las emisiones de CO₂ en las fundiciones. En primer lugar se puede optar por el enfriamiento controlado de escorias para su posterior tratamiento por molienda y flota-

ción. En segundo lugar, si se logra llegar a la etapa de refinación a fuego con un cobre blíster cuya impureza principal es azufre, sin otras impurezas como As, Sb o Bi, se puede implementar una operación de refinación a fuego más breve y eficiente en términos de uso de energía, consumo de hidrocarburos y emisiones de gases de combustión.

El sol también puede ser utilizado para generar calor. Esto se llama energía termosolar, la cual permite disminuir el uso de diésel en procesos que requieren calentamiento de soluciones, como el proceso de electro-obtención. El Prof. Cardemil estima que es viable usarla en minería, el único problema sería el factor volumen, que dado el alto consumo del sector se requieren instalaciones muy grandes. Entonces, sería un problema de costos de instalación más que de factibilidad tecnológica.

Figura 10:
GWP tonelada de cobre producida, 2014 (tCO₂eq/tCu)



Fuente: Adaptado de Moreno-Leiva et al. (2017)

Otro desafío que menciona el académico es que la energía termosolar a veces requiere adaptar los procesos productivos y contratar profesionales especializados.

A modo de ejemplo, en Chile tenemos una de las plantas termosolares más grandes del mundo. Este proyecto, inaugurado en 2013, provee a la división Gabriela Mistral de CODELCO y contribuye en promedio con 54.000 MWh/anuales de energía calórica, reemplazando un 85% de los combustibles fósiles usados en el proceso de electro-obtención y disminuyendo las emisiones en 15.000 toneladas de CO₂ anuales (Energía Llama, 2015).

nología a nivel local. A la vez, nos ayudaría a reducir nuestras emisiones y transformaría a la minería en una industria líder en estos temas, permitiéndonos incluso vender un producto diferenciado sustentable.

Geotermia: una fuente de energía limpia y disponible 24/7

La geotermia utiliza el calor de la tierra para generar energía y permite tener un suministro constante que no depende del clima o las estaciones del año. Chile posee ventajas para



En síntesis, las características de nuestro país son únicas y, por lo mismo, se presenta un importante desafío relacionado al desarrollo de tecnologías que permitan integrar de mejor manera la energía solar y la minería. Se puede esperar que esto se transforme en un motor que impulse el desarrollo de la ciencia y tec-

desarrollarla, ya que tiene una de las mayores actividades volcánicas del mundo. Nuestro potencial geotérmico se calcula entre 3.350 MW hasta los 16.000 MW, lo que podría llegar a significar un 91% de nuestra capacidad instalada actual (CEGA, 2017).



La geotermia tiene una relación positiva y poco explotada con la minería. Muchos proyectos mineros próximos a inaugurarse se ubicarán cerca de zonas geotermiales (Morata, 2018). Además, existe una oportunidad de negocio, que consiste en recuperar los minerales que son arrastrados a través del agua de los flujos utilizados en el proceso geotermal, donde se encuentra oro, litio, níquel, cobre, etc. (Morata, 2018).

Uno de los obstáculos que tiene la geotermia son sus costos elevados. Si el Estado chileno tiene planeado incrementar la participación de la geotermia en la matriz energética, debe involucrarse como un actor partícipe.



Electromovilidad: una solución para reducir las emisiones directas de la minería

El diésel, utilizado principalmente en camiones y otras maquinarias, es responsable del 89% de las emisiones de alcance 1 de la minería chilena del cobre (COCHILCO, 2016a) y de un 26% si consideramos las emisiones totales (alcance 1 y 2).

Los vehículos eléctricos son la tecnología más prometedora para reemplazar a los motores a combustión debido a que son menos contaminantes, más silenciosos y requieren menos mantenimiento. Además, según el académico del Departamento de Ingeniería Mecánica, Williams Calderón, estos vehículos son más eficientes, ya que si comparamos una batería con un estanque de combustible equivalentes en energía, el automóvil eléctrico recorre 3 km y el



Los vehículos eléctricos son la tecnología más prometedora para reemplazar a los motores a combustión debido a que son menos contaminantes, más silenciosos y requieren menos mantención.

convencional solo 1. Igualmente, estos vehículos son más seguros, sobre todo en la minería subterránea, ya que no liberan gases tóxicos ni material particulado y generan menos calor, lo que reduce la necesidad de ventilación y permite ahorrar energía (Kirk & Lund, 2018).

Empresas como Sandvik y MacLean ya ofrecen camiones LHD eléctricos para la minería (Sandvik, 2019). Además, Goldcorp abrió la primera mina subterránea 100% eléctrica en septiembre de 2019, donde espera disminuir un 70% de sus emisiones, 2 millones de litros de diésel y un millón de litros de propano al año (Moore, 2018). Esto demuestra que es factible transformar la minería a una industria más limpia y responsable con su entorno. Nuevamente surge la interrogante de por qué no se ha hecho o no se está planeando hacer en nuestro país.

La minería chilena es el sector que posee la mayor cantidad de buses eléctricos después del transporte, sin embargo, estos son usados solo para trasladar personal. Según Paulina Ramírez, investigadora del Centro de Energía de la Universidad de Chile, la electromovilidad es factible para camiones de bajo tonelaje (200 toneladas) y cargadores frontales, por lo que solo se requiere tomar la decisión de cambiarlos.

Motores de hidrógeno para los grandes camiones de la minería

El principal obstáculo que presenta la electromovilidad es su incapacidad para alimentar camiones de alto tonelaje, debido al peso que tendría la batería. Una alternativa es el hidrógeno, ya que permite alimentar vehículos pesados que recorren largas distancias. Esta también es una opción para vehículos livianos.

El hidrógeno es un combustible que se obtiene de la separación del agua. Hablamos de "hidrógeno verde" cuando se produce con energía de fuentes renovables¹³. El norte de Chile tiene importantes ventajas en la producción de hidrógeno verde, ya que este proceso necesita dos insumos: ERNC y agua desmineralizada. Por lo que la desalinización y el hidrógeno verde podrían formar una alianza importante para la minería, sobre todo porque su producción requiere menos del 1% del agua consumida en una mina (Vásquez et al., 2019).

Ya existe un tren alimentado con hidrógeno. El Coradia iLint, de la empresa Alstom, el cual corresponde al primer tren para pasajeros con un motor de celda de hidrógeno. Ha sido tan exitoso que ya le han encargado a la misma compañía la construcción de 27 trenes similares para distintas localidades de Europa (Alstom, 2019).

El hidrógeno podría ser una solución menos problemática que el litio, debido a que necesita pequeñas cantidades de agua. Sin embargo, al producir hidrógeno mediante celdas de combustible se requerirán materiales como el platino o tierras raras. De acuerdo a la Prof. Melanie Colet, académica del Departamento de Ingeniería Química Biotecnología y Ma-

El norte de Chile tiene importantes ventajas en la producción de hidrógeno verde, ya que este proceso necesita dos insumos: ERNC y agua desmineralizada.

teriales, es importante considerar el ciclo de vida completo y determinar el impacto que tiene la extracción de estas materias primas y la producción de las baterías de litio y las celdas de combustible para saber qué tanto estamos disminuyendo nuestras emisiones respecto a los vehículos convencionales y en qué parte del proceso productivo tenemos que enfocarnos para que sea más sustentable.

En Chile ya se está hablando de hidrógeno. El Comité Solar junto a la CORFO proponen una estrategia para el desarrollo del mercado del hidrógeno verde, el cual busca transformarnos en un líder mundial en la producción de este combustible.

Por otro lado, es importante destacar que en un escenario con recursos limitados, como es la realidad de Chile, no sea posible impulsar una industria local para el litio e hidrógeno, sino que se deba optar por impulsar solo uno de ellos. Se requiere más análisis e investigación para determinar cuál de las dos industrias puede ser más beneficiosa para nuestro país, considerando los recursos naturales, geografía y economía que nos caracterizan.

¹³ En la actualidad, la mayor parte del hidrógeno no es producido de forma sustentable.

III. Adaptación al cambio climático



En el capítulo anterior se detallaron diversas propuestas para mitigar los efectos del cambio climático a través de la reducción de emisiones de GEI. Sin embargo, aunque logremos restringir el incremento de temperatura a 1.5°C, el cambio climático provocará desastres ambientales de todas formas, por lo que tenemos que estar preparados para enfrentarlos de la mejor forma posible. Esto se denomina "adaptación".

Vulnerabilidad de la minería frente al cambio climático

A diferencia de otras industrias que pueden cambiar de lugar ante riesgos climáticos, la minería está condicionada a operar donde se encuentran los recursos. Bajo este contexto, la adaptación debe ser un eje principal, sobre todo para un sector vulnerable al cambio climático. Esta vulnerabilidad se debe a que la

minería se ubica comúnmente en geografías complejas, posee activos con extensos periodos de vida útil, forma parte de cadenas de suministros globales y necesita recursos que son vulnerables a la variabilidad climática, como el agua y la energía (International Council on Mining & Metals, 2013).

Un clima cambiante podría afectar la estabilidad y efectividad de la infraestructura y equipamiento de la minería. La mayoría de las instalaciones fueron diseñadas y construidas asumiendo que el clima se mantendría constante, por lo que las construcciones, la estabilidad de las laderas y los tranques de relaves podrían verse afectados ante una futura variación del clima (Pearce et al., 2011). Adicionalmente, se pueden generar problemas en los puertos o rutas de acceso, retrasando el proceso productivo y la cadena de suministro, es decir, afectando la cadena de valor.



La ocurrencia de eventos climáticos extremos—sobre todo cuando son inusuales y difíciles de prever—interrumpen las operaciones, provocando pérdidas financieras. Por ejemplo, los eventos de enero de 2019 (frente de mal tiempo que afectó al norte del país) generaron una caída de un 5,1% de la producción nacional de cobre durante el primer trimestre del 2019 en comparación al mismo periodo de 2018 (COCHILCO, 2020).

A continuación, se describen los principales eventos que afectan a la minería:

- **Precipitaciones e inundaciones**

Se estima que en el norte y centro del país las precipitaciones serán menos recurrentes pero más intensas y cálidas (Molina & Lagos, 2019). Esto puede provocar fallos en los relaves, descargas de agua contaminada, aumento de costos de procesos de descontaminación, impactos en la salud y seguridad de la comunidad, daño a la reputación de la empresa y alteración de transporte (Nelson & Schuchard, 2011).

En el norte de Chile se experimenta el invierno boliviano, fenómeno que provoca intensas lluvias en el Desierto de Atacama. En febrero

**Isoterma
cero:**

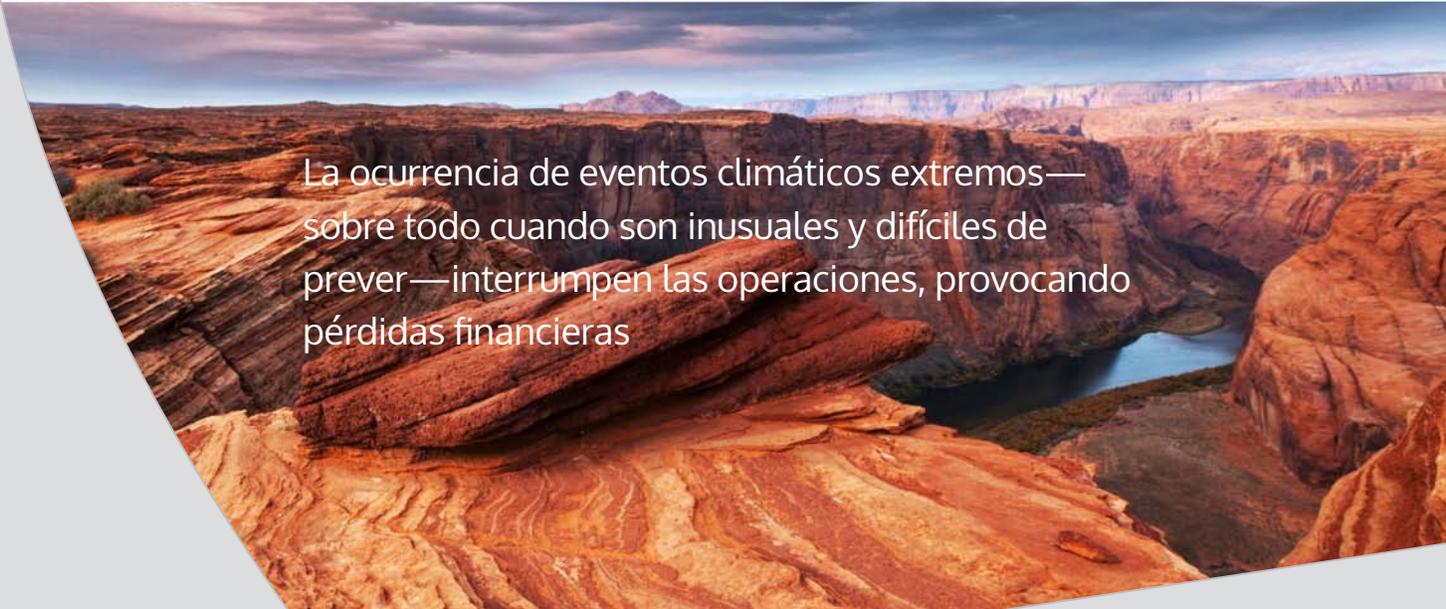
Determina el límite desde donde habrá lluvia y desde donde esta caerá como nieve.

de 2019 sus efectos fueron más fuertes que lo habitual, lo que provocó pérdidas humanas y el cierre temporal de operaciones mineras localizadas en la zona, como es el caso de Chuquicamata y Ministro Hales (BBC, 2019a)

Adicionalmente, las lluvias intensas pueden desatar otros desastres naturales, por ejemplo, los aluviones (Terlien, 1998).

- **Aluviones**

Chile en un país vulnerable al acontecimiento de aluviones. Los modelos climáticos permiten proyectar que la isoterma cero tendrá una cota más alta y nos enfrentaremos a una mayor área pluvial (Molina & Lagos, 2019), por lo que el riesgo de aluviones se incrementará.



La ocurrencia de eventos climáticos extremos—sobre todo cuando son inusuales y difíciles de prever—interrumpen las operaciones, provocando pérdidas financieras

Los aluviones pueden llegar a ser catastróficos para la minería. Ya tenemos la experiencia de lo que ocurrió en Brasil en dos oportunidades con sus relaves, donde murieron cientos de personas y se destruyeron pueblos enteros. Esta experiencia hizo que la minera Vale pasara de ser un orgullo nacional a una de las empresas más odiadas, provocando además importantes caídas en sus acciones después del desastre, multas, suspensión de dividendos y posibles cargos criminales (BBC, 2019b). Si esto llegase a ocurrir en Chile podría provocar un impacto similar y generar una externalidad negativa para toda la minería, que podría ser incluso peor, debido a la importancia que tiene esta industria en nuestra economía y la ya problemática relación que tiene con las comunidades locales.

Por otro lado, la actividad minera tiene un impacto en la ocurrencia de estos fenómenos. Según indica Germán Aguilar, investigador del AMTC, el material no consolidado generado por la minería es susceptible a ser removido por una lluvia catastrófica, lo que aumenta el riesgo de inundaciones y aluviones.

- **Sequías**

La sequía será uno de los mayores problemas en Chile a corto plazo. A pesar de que el consumo de agua de la minería representa solo el 3% del consumo total de agua en Chile, muchas de las faenas se concentran en lugares que experimentan estrés hídrico, por lo que la tensión sobre el uso del agua con las comunidades locales es probable que se intensifique.

Según Miguel Lagos, investigador del AMTC, algunas faenas mineras le arriendan los derechos de agua a regantes; sin embargo, el problema es que, si la hidrología de la cuenca cambia, la abundancia de agua del verano podría trasladarse al invierno, desincentivando

Los modelos climáticos permiten proyectar que la isoterma cero tendrá una cota más alta y nos enfrentaremos a una mayor área pluvial (Molina & Lagos, 2019), por lo que el riesgo de aluviones se incrementará.

la venta de estos derechos. Según Santiago Montserrat, también investigador del AMTC, no solo se experimentará un cambio en la cantidad disponible de agua, sino que se alterará su disponibilidad en el tiempo; es decir, la minería tendrá que reestructurar sus operaciones para adaptarse a cambios en la disponibilidad hídrica.

En la zona norte, donde se experimenta escasez de agua de forma permanente, la minería ha recurrido a la desalación para satisfacer su demanda. Sin embargo, en la zona central, donde el recurso hídrico se obtiene por otros medios, los impactos de la sequía podrían ser peores, debido a su gran densidad poblacional y la fuerte presencia del sector agropecuario, donde la ciudadanía preferirá entregarle el agua a la agricultura para la producción de alimentos antes que a la minería. Por ejemplo, la

A pesar de que el consumo de agua de la minería representa solo el 3% del consumo total de agua en Chile, muchas de las faenas se concentran en lugares que experimentan estrés hídrico, por lo que la tensión sobre el uso del agua con las comunidades locales es probable que se intensifique.

mina Los Bronces ha experimentó una caída de un 28% de su producción del cuarto trimestre del 2019 debido a la sequía, causando además una disminución del 44% en el procesamiento de planta (Pizarro, 2020). Minera Escondida también podría tener problemas este año, ya que tuvieron que cerrar un pozo a fines de 2019, y a pesar que en 2017 ingresaron un proyecto para extender la extracción de agua, este está suspendido debido al rechazo de la comunidad (Pizarro, 2020).



Adicionalmente, un aumento de las temperaturas en la Cordillera de los Andes podría cambiar la isoterma cero y generar aluviones.

- **Aumentos del nivel del mar**

En el 2019 el IPCC presentó su informe de océanos, donde estima una crecida promedio de un metro del nivel del mar en el mundo en los próximos 80 años. Sin embargo, según Catalina Aguirre, Investigadora del (CR)2, Chile tiene la ventaja de ser un país alto, por lo que este



Si se quisiera recurrir a la desalación más al sur del país, nos enfrentamos a un nuevo dilema entre la huella hídrica y la de carbono, dado que los sistemas de desalación e impulsión son intensivos en uso de energía y por el momento la minería sigue satisfaciendo su demanda de electricidad con una matriz energética que tiene alta presencia de carbón.

- **Altas temperaturas**

El aumento de las temperaturas puede ser perjudicial para la minería, ya que es posible que altere la disponibilidad del agua. Según Miguel Lagos, es probable que donde solía nevar, ahora llueva, restringiendo las reservas de agua para el verano. Por otro lado, podría aumentar la evaporación de los relaves (Pearce et al., 2011).

no sería nuestro mayor riesgo ante el cambio climático (Heselaars & Díaz, 2019). Aguirre menciona que sí podríamos vernos afectados por aumentos del oleaje, lo cual ya ha alterado la hora de cierre de los puertos en los últimos años, generando un impacto económico negativo para el país. Además, es probable que afecte a los pueblos y ciudades ubicados en la costa, sobre todo a pueblos organizados en torno a la pesca.

A pesar de que las instalaciones mineras están normalmente ubicadas en altura y no se verían afectadas por un incremento en el nivel del mar, la industria posee operaciones críticas en la costa que sí podrían verse perjudicadas, como las desaladoras y los puertos. Si la situa-

ción de los puertos empeora es probable que esto afecte la exportación de cobre, lo cual perjudicaría la producción de concentrado, debido a que es posible que se genere una dificultad para embarcarlo, junto a la disponibilidad limitada de espacios de acopio del mismo.

La minería chilena y la adaptación

Hasta el momento, la prioridad de la industria minera en Chile ha sido la adaptación a la es-



La industria posee operaciones críticas en la costa que sí podrían verse perjudicadas, como las desaladoras y los puertos.

Dadas las condiciones de nuestra geografía, es razonable afirmar que los aluviones pueden llegar a ser los peores eventos para nuestra minería, por lo que debería ser prioridad de la industria en términos de adaptación.

casez hídrica, sin embargo, esto ha cambiado. Según Francisco González, académico del Departamento de Ingeniería de Minas, en los últimos años se destacan dos grandes vuelcos en temas de adaptación: consideración de múltiples tipos de eventos (nieve, viento, y lluvia) y formalización de planes estacionales (verano o invierno) orientados a tener una mejor preparación para enfrentar las consecuencias de un posible evento extremo.

Pero pareciera no ser suficiente. En la SONAMI comentan que a pesar de que las empresas han empezado a disminuir sus emisiones, están más atrasadas en temas de adaptación, principalmente porque las consecuencias parecieran ser más graves que lo que habían dimensionado inicialmente (Minería Chilena, 2019). Además, la minería opera alrededor de un plan anual que está impulsado por metas de producción, por lo que este foco de corto plazo a veces evita tener un estudio sistemático y visionario de los factores externos que podrían influenciar la viabilidad de largo plazo de las operaciones (Sharma et al., 2013).

Por lo tanto, a pesar de que la minería está cambiando sus planes estacionales e implementando algunas medidas, más que adaptarse a cambios en el clima que pueden alterar su productividad, la industria debería prepararse para enfrentar eventos climáticos extremos que pueden provocar desastres catastróficos para su sector, en términos de pérdidas humanas y económicas. Dadas las condiciones de nuestra geografía, es razonable afirmar que los aluviones pueden llegar a ser los peores eventos para nuestra minería, por lo que debería ser prioridad de la industria en términos de adaptación.

IV. Propuestas para lograr una minería baja en emisiones

40





El cumplimiento del Acuerdo de París dependerá del nivel de esfuerzo de cada país y sector productivo, por lo que a continuación definimos rutas de acción para la minería y comparamos los escenarios.

Rutas de acción para la minería chilena

- **Seguir con lo habitual** (*Business as usual*)

Si suponemos que la minería no hace nada adicional para disminuir sus emisiones, de todos modos reducirían sus emisiones de alcance 2 como consecuencia del cambio en la matriz energética. No obstante, se estima que el consumo energético de la minería del cobre aumentará en un 41% al año 2029 (COCHILCO, 2018c), por lo que seguiría teniendo una gran participación en las emisiones de GEI del país a pesar del esfuerzo del sector eléctrico.

Por otro lado, no habría un ahorro de electricidad ni de diésel, lo que posiblemente aumente la participación de la minería en las emisiones del país, debido principalmente al esfuerzo de otros sectores, como transporte, por ejemplo¹⁴. Dado que la lucha contra el cambio climático debe ser impulsada por todos los sectores, el restarse de esta iniciativa podría traer consecuencias en la reputación de las industrias que no colaboren.

Es posible que esto también impacte la demanda del cobre chileno. En un mundo donde la sustentabilidad se valora cada vez más y donde es probable que comiencen a aparecer mercados diferenciados, es posible que el cobre chileno pierda competitividad.

¹⁴Se espera que el transporte público sea 100% eléctrico al 2040 (Ministerio de Transporte, 2019).



- **Incorporación de la electromovilidad y eficiencia energética**

La minería aumenta su eficiencia energética para reducir el uso de la electricidad e implementa electromovilidad en vehículos de transporte y bajo tonelaje, pero no se responsabiliza de sus emisiones de alcance 2. En este escenario su desempeño es superior, pero no óptimo debido a que los camiones de alto tonelaje y algunos procesos (como las fundiciones) siguen utilizando diésel. Las emisiones de alcance 2 seguirán el mismo curso que en el escenario “*business as usual*”, pero con una leve mejora debido a la implementación de eficiencia energética.

- **La industria se hace cargo de sus emisiones de alcance 1 y 2 e incentiva la Investigación y el Desarrollo (I&D)**

Además de hacerse cargo de sus emisiones de alcance 1 y 2, la industria colabora con centros de investigación y desarrollo para buscar soluciones tecnológicas para el reemplazo del uso de diésel en camiones de alto tonelaje y nuevas tecnologías para las fundiciones.

Si la minería genera su propia electricidad con ERNC o incentiva al sector energético a acelerar la descarbonización, la disminución de sus emisiones sería mucho más rápida. Esto no solo reduciría su huella de carbono, sino que sería un gran aporte al país, a la vez que mejoraría la imagen de la industria, tanto a nivel local como internacional.



Un escenario ambicioso para la minería chilena

Es importante que la minería colabore en este proceso. Esta industria tiene efectos importantes en el entorno donde opera, como la contaminación directa del aire, agua, acústica, etc., que preocupan más a las comunidades que el tema de las emisiones de CO₂¹⁵. Hasta el momento, la lucha ambiental en Chile se ha enfocado más en estos aspectos locales, lo que sin duda ha generado cambios importantes, tanto a nivel legislativo como en la forma en que opera la minería y se relaciona con la ciudadanía. La industria está abordando muchos de estos problemas, pero es necesario que tome control sobre su huella de carbono, dado que en el futuro la atención sobre este tipo de emisiones aumentará, cuando el problema del calentamiento global sea más grave y visible. Según el Prof. Rodrigo Palma, director del Centro de Energía, en la actualidad

¹⁵ Para más información respecto a las comunidades, revisar versión extendida del documento. Adicionalmente, el tema de minería y comunidades será abordado de forma más profunda en un próximo estudio de Beauchef Minería.



La minería podría hacer un mayor esfuerzo para colaborar en el proceso de descarbonización. Esto posicionaría al cobre chileno como un producto diferenciado y limpio, mientras se genera un nuevo mercado.

se contabiliza todo lo que se emite, por lo que la sociedad en un futuro podría cuestionar el porcentaje del presupuesto de carbono que utilizó cada industria y exigir que demuestren que generaban realmente valor a la sociedad.

¿Cuándo podría la minería lograr este escenario óptimo? El gobierno se comprometió a descarbonizar la matriz energética al 2040 a través de un cierre programado de las centrales termoeléctricas a carbón. Sin embargo, un estudio de la consultora KAS Ingeniería (2019), señala que es factible retirar las plantas a carbón al año 2030, ya que a pesar de que existe un mayor costo asociado a la inversión y ampliación de la transmisión al descarbonizar, dado que los costos de operación serían más bajos (se ahorra en compra de combustible), el costo total de un escenario sin plantas a carbón sería de solo US\$ 2.414 millones más caros que un escenario sin descarbonización. Este estudio impulsó a que, en septiembre de 2019, la Cámara de Diputados le sugiriera al Presidente de la República que

adelantara la descarbonización al 2030 (Cámara de Diputados de Chile, 2019). Dado que este plan no considera inversión pública, sino que se basa en acuerdos voluntarios con el sector privado, se infiere que en caso de contar con el apoyo del Estado, el país podría alcanzar metas más ambiciosas.

Posteriormente, en octubre 2020 la Cámara de Diputados aprueba en general proyecto que busca adelantar al 2025 el cierre de estas plantas, por lo que será devuelto a la Comisión del Medio Ambiente para ser discutido en particular (EMOL, 2020).

La minería podría hacer un mayor esfuerzo para colaborar en el proceso de descarbonización. Esto posicionaría al cobre chileno como un producto diferenciado y limpio, mientras se genera un nuevo mercado, como ha pasado con los diamantes, el estaño y está empezando a ocurrir con el cobalto. Esto podría ser atractivo desde una perspectiva

económica. No obstante, para poder realizar una evaluación se debe enfrentar el desafío de estimar la diferencia de precio que tendría un cobre verde para luego analizar si esto permitiría financiar la transformación energética.

Consideramos que esto es factible. Chile se caracteriza por su gran minería, la cual representa el 94,6% de la producción nacional de cobre y, además, es muy concentrada, ya que solo 5 empresas generan el 85,5% (CODELCO, BHP, Anglo American, AMSA y Freeport) (COCHILCO, 2019b). Si estas empresas impulsan este cambio, la mayoría de nuestra producción mejoraría sus índices ambientales. Además, existe una gran concentración de la minería en el norte, donde tenemos ventajas en la generación de energía solar. Por otro lado, el Estado debe exigir a CODELCO cumplir con ciertos estándares y usarlo como un ejemplo para el resto de la industria chilena.

Para llegar a este escenario elaboramos las siguientes propuestas que permitirían que la minería reduzca sus emisiones y sea responsable y resiliente al cambio climático.

Desarrollo de las energías renovables y la electromovilidad

Dado que la minería emite grandes cantidades de GEI, se deberían desarrollar políticas públicas que incentiven la adopción de ERNC y electromovilidad en el sector. Para esto, debe generarse una real colaboración entre los ministerios de Minería, Energía y Medio Ambiente.

- **ERNC:**

A pesar de que existen esfuerzos para aumentar la presencia de las ERNC en la matriz energética, no hay metas específicas para la minería. Una buena iniciativa sería exigir a la gran minería que un porcentaje de su electricidad provenga de fuentes renovables, a través, por ejemplo, de una nueva legislación ambiental más ambiciosa que sea capaz de comprometer a la industria minera y a otros sectores productivos relevantes.

- **Electromovilidad y motores de hidrógeno**

Es fundamental que la electromovilidad sea impulsada en conjunto con las ERNC, ya que su huella de carbono dependerá de qué tan limpia sea la matriz energética.

Para que la electromovilidad y el hidrógeno sean una realidad en la minería en Chile, hemos identificado seis líneas de acción necesarias.



1. Aspectos técnicos:

Ya existen alternativas eléctricas para la mayor parte de la maquinaria en minería, excepto para la maquinaria pesada. Un sustituto factible son los camiones de hidrógeno, sin embargo, habría que adaptarlos a las condiciones de la minería. Para esto, se requiere más investigación y expertos, ya que, según la Prof. Melanie Colet, son escasos los especialistas en este tema en Chile. Por otro lado, la Prof. Colet indica que habría que buscar soluciones para su transporte y almacenamiento, ya que el proceso actual (comprensión en cilindros) tiene un alto consumo energético.

2. Capacitación:

Se requerirá un proceso de capacitación y adaptación para alcanzar eficiencia y seguridad en la conducción de los vehículos eléctricos. Según el Prof. Williams Calderón, para

alguien que no está familiarizado con estos vehículos, ver que el medidor baja y sube bruscamente puede provocar un estrés que dificulte su conducción y no permita alcanzar la eficiencia máxima; esto se denomina "ansiedad de rango". Por lo tanto, hay un desafío importante en la capacitación de los trabajadores, donde no solo hay que educar al conductor, sino que también a los mecánicos, los cargadores y a todo aquel que deba interactuar con estos vehículos¹⁶.

3. Normativa e impuestos:

Las normas e impuestos son fundamentales para mejorar el desempeño ambiental. Según Paulina Ramírez, en Chile no estamos muy avanzados en este tema y mientras no sea exigido por ley, es difícil que ocurran cambios a la velocidad que necesitamos. Un ejemplo es el proyecto de ley de eficiencia energética,

¹⁶ Los motores eléctricos no emiten sonido y por lo tanto no avisan cuando se acercan.



que a pesar de que sí considera multas, estas son muy bajas, llegando a solo 20 unidades tributarias anuales (Senado, 2019).

Por lo tanto, generar un aparato normativo exigente que guíe el actuar de las empresas hacia la sustentabilidad es necesario para acelerar el cambio. Por ejemplo, es necesario gravar las emisiones de los combustibles para que sus costos reflejen sus externalidades negativas. Esto ha sido clave en países exitosos en la integración de la electromovilidad, sobre todo si se logra igualar el precio de los vehículos eléctricos con los convencionales (International Energy Agency, 2018).

4. Políticas estatales y colaboración público-privado para generar una industria local

Es probable que el tamaño de nuestra economía nos limite a tener que apostar por una sola tecnología para generar una industria local. Una opción son las baterías, lo cual sería fundamental para que se desarrolle la electromovilidad. Además, Chile tiene ventajas para su fabricación: posee grandes reservas de cobre y litio y, en menor medida, de cobalto y manganeso. Debido a esto, ya hay voluntad de generar una industria local; existe un precio preferente de litio para empresas ubicadas en Chile y se propone crear un Instituto de Tecnologías Limpias.

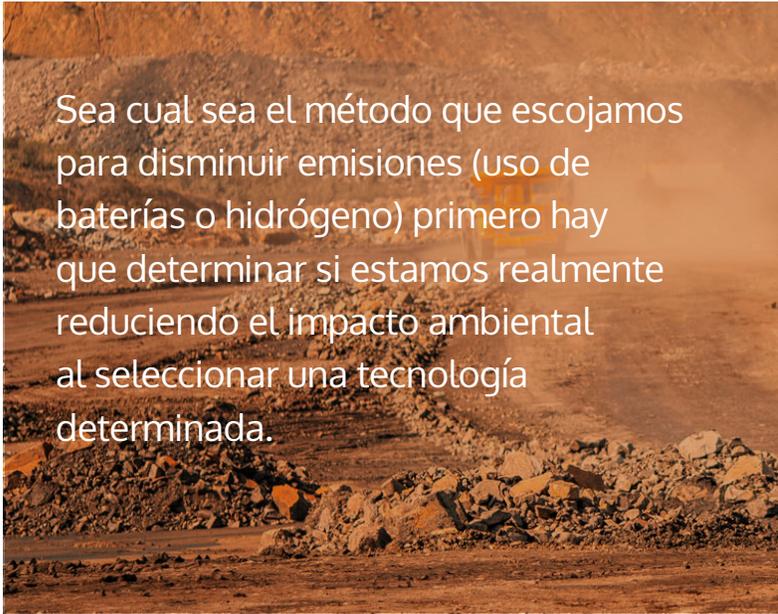
Por otro lado, tenemos la opción del hidrógeno, que a pesar de que CORFO ya está buscando generar una industria local, se sugiere impulsar una estrategia regional, enfocada en Antofagasta y Atacama, ya que se podrían aprovechar sus ventajas en la producción de hidrógeno verde para descentralizar nuestro país (Tractebel, 2018) mientras nos transformamos en exportadores de energía eléctrica.

5. Compromiso de parte de la industria

Es necesario construir una *hoja de ruta tecnológica* para la adopción de energías renovables y electromovilidad que incorpore la flexibilidad dentro del diseño, permitiendo que nuevas tecnologías se adhieran apenas alcancen madurez (Mitchell, 2019). A pesar de que es un esfuerzo grande en términos económicos y de tiempo, es importante contar con ellos. Esto podría ser liderado por centros de pensamiento o desde la academia en conjunto con la industria.

Sea cual sea el método que escojamos para disminuir emisiones (uso de baterías o hidrógeno) primero hay que determinar si estamos realmente reduciendo el impacto ambiental al seleccionar una tecnología determinada. Es fundamental considerar el ciclo completo, ya que la generación de esta tecnología podría haber contaminado más que el ahorro asociado a su utilización. Por esto, es importante desarrollar investigación que los compare.

Toda tecnología tendrá un impacto, por lo que nuestra labor es intentar transparentar esto y buscar la opción más limpia y con menos impacto social.



Sea cual sea el método que escojamos para disminuir emisiones (uso de baterías o hidrógeno) primero hay que determinar si estamos realmente reduciendo el impacto ambiental al seleccionar una tecnología determinada.

Figura 11:
Economía circular



Fuente: Adaptado de EIT RawMaterials (2019)

Economía circular en minería: una forma inteligente de usar los recursos

Actualmente, seguimos un enfoque de economía lineal; los productos terminan en un vertedero o incinerados al final de su vida útil, lo

cual es intensivo en uso de materias primas y energía. Como una alternativa surge la economía circular, la cual busca aumentar la productividad de los recursos al reutilizarlos y, en última instancia, reciclarlos.

La economía circular se vuelve cada vez más popular. Los europeos están dispuestos a pagar en promedio un 58% más por productos producidos responsablemente (Smits et al., 2015). Por esto, es de esperar que, tal como ha ocurrido en el sector forestal y el alimentario, surjan logos ambientales que regulen la producción de metales. En consecuencia, Chile podría aprovechar esta oportunidad y ser pionero en este tema.





Dado que Chile es una economía pequeña que no podrá abordar en primera instancia una economía circular muy amplia, es importante enfocar los esfuerzos en proyectos factibles y rentables para nuestra economía. A pesar de que está demostrado que reciclar el cobre tiene amplios beneficios en términos de reducción de emisiones de GEI (estimaciones entre el 35 y 90%) (Bureau of International Recycling, 2008; European Copper Institute, 2012; Institute of Scrap Recycling Industries, 2018; International Copper Association, 2017), no será primera prioridad en Chile, porque somos productores de cobre primario. Además, es imposible abastecer la demanda solo con reciclaje y como país seguiremos extrayendo cobre, incluso aunque el reciclaje alcance su mayor nivel de eficiencia. Pero el cobre no es el único elemento en el que se puede optar por una economía circular. Se debe poner atención también en la creciente producción de baterías y la necesidad de reutilización y reciclaje de las mismas. A diferencia del cobre,

Chile aún no es productor de baterías, por lo que se podría concentrar no solo en generar una industria local que eventualmente las produzca, sino también poner esfuerzos en instalar capacidades de reutilización y reciclaje.



Construir un vehículo eléctrico emite el doble de CO₂ que producir uno convencional, debido principalmente a la batería (Tagliaferri et al., 2016), por lo que se debe fomentar su reutilización y reciclaje. Para las baterías existe la “segunda vida”, que consiste en darles un nuevo uso una vez que son removidas de los automóviles, pudiendo mantener una capacidad del 75%-80% de su rendimiento original (Hall & Lutsey, 2018). Según Paulina Ramírez, estas podrían cumplir un rol esencial en el almacenamiento de energía en las minas.

Una vez que las baterías ya no se puedan seguir reutilizando, habrá que reciclarlas. Si se estandariza su química, estructura y producción y se crean regulaciones que las etiqueten y monitoreen, su reciclaje podría ser rentable (Hall & Lutsey, 2018).

En Chile ya se está avanzando en esto. La ley REP (responsabilidad extendida del productor) obliga a las empresas a hacerse cargo de sus baterías. Sin embargo, no tenemos la capacidad de re-manufacturarlas. Entonces, surge la interrogante sobre qué se hará con ellas; si serán enviadas al extranjero sin ningún seguimiento, traspasándole el problema a otros; o si, por el contrario, desarrollaremos un mercado de reciclaje local. En este aspecto, se debería fomentar un ambiente propicio, a través de financiamiento para I&D, creación de institutos financiados por el Estado que permitan vincular industria y academia y formación de profesionales en el área.

El enfoque de economía circular se puede aplicar también a los neumáticos e incluso a la desalación¹⁷.

También se puede aplicar economía circular al hidrógeno verde:

Al igual que las baterías, si las celdas de combustible no se reciclan, podrían no ser sustentables. Dado que el mercado del hidrógeno es nuevo, aún falta desarrollo industrial e investigación para que esto ocurra. Chile podría aprovechar esta oportunidad y transformarse en una potencia del hidrógeno verde e integrar el concepto de economía circular a la producción de las celdas de combustible. Según Melanie Colet, si Chile no lo hace, lo hará Arabia Saudita y una vez más seremos espectadores y terminaremos importando la tecnología.

¹⁷ Para más información, ver versión extendida del documento.



Chile aún no es productor de baterías, por lo que se podría concentrar no solo en generar una industria local que eventualmente las produzca, sino también poner esfuerzos en instalar capacidades de reutilización y reciclaje.

Cobre responsable: las ventajas de Chile para su desarrollo

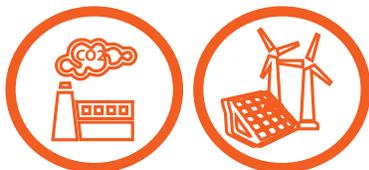
Según Óscar Landerretche, académico de la Facultad de Economía y Negocios de la Universidad de Chile, tenemos grandes ventajas para desarrollar un cobre responsable, ya que mineras como Ministro Hales y Gaby tienen altos estándares de seguridad, respeto a los derechos humanos y éticas impecables; solo faltaría mejorar el tema ambiental. El académico propone un esquema institucional que integre la sustentabilidad en el modelo de negocio de la minería, creando un cobre trazable y un mercado diferenciado certificado, como ocurre con los diamantes y el estaño. Recalca que "esto es particularmente importante para un país como Chile, ya que somos un distrito minero caro y nunca más vamos a volver a competir por precios; sin embargo, podemos apuntar a ser un país desarrollado, los cuales son competitivos, y para esto hay que tener una propuesta de valor que otros no puedan o les sea difícil de replicar".

Cobre responsable:

Cobre producido por una minería que cumpla con exigentes estándares ambientales, respeto a las comunidades, los DD.HH. y la seguridad de sus trabajadores.

Para lograr esto se podrían impulsar colaboraciones público-privadas y al interior del propio sector público, dado que, se requiere la participación del Estado, sobre todo de CODELCO ya que sería un ejemplo para el resto de las empresas respecto a la viabilidad tecnológica, económica y social de llevar a cabo un proceso sustentable.

Esta lógica podría aplicarse también al cobalto. En la República Democrática del Congo (mayor productor de cobalto del mundo) existen minas controladas por grupos armados y operadas por niños, lo que llevó a la prohibición de la compra de cobalto que provenga de estas faenas. Según el Prof. Brian Townley, en Chile hay cobalto en los relaves, por lo que, si aprovechamos esta oportunidad, podríamos ofrecer un producto que cumple con estándares sociales, de derechos humanos y ambientales. Al mismo tiempo, estaríamos reutilizando un pasivo ambiental.



Colaboración entre el sector privado, sector público y la academia

Dado que la minería en Chile tiene características particulares y únicas, muchas veces es necesario adaptar o reinventar tecnologías para poder aplicarlas a la realidad local. Por esto, es fundamental que el Estado invierta en I&D y apoye a las universidades y centros de investigación para que puedan encontrar soluciones prácticas para la minería y generar un ecosistema de innovación en el país (Meller & Salinas, 2019).

Es importante también una participación más activa del sector privado. En el caso del hidrógeno, del litio y la eventual producción local de baterías, reutilización y reciclaje, el sector público, privado y la academia deberían trabajar en conjunto para impulsar una industria local que aproveche las ventajas de Chile.

El rol de la academia

La academia se ha enfocado en buscar soluciones tecnológicas al problema medioambiental, lo cual sin duda ha generado importantes avances. Sin embargo, el problema del sistema de producción de conocimiento científico actual es que tiende a enfocarse en temas específicos y reducidos. Según Rodrigo Jiliberto, colaborador del Centro de Sistemas Públicos, dado que este problema no es tecnológico, sino más bien social, se requiere multidisciplinariedad en la investigación y en la formación de los investigadores, para ampliar su perspectiva y que puedan considerar otras variables al estudiar el cambio climático.

Otro rol importante de la academia es la formación de profesionales. Según Jiliberto, si queremos inculcarle consciencia medioambiental a los/as profesionales que formamos, primero debemos definir la posición de la propia Universidad y Facultad al respecto. Por ejemplo, los ingenieros y las ingenieras en minas no debiesen limitar su conocimiento a lo que ocurre en la mina, sino que deberían entender qué significa hacer minería en Chile, según su cultura, geografía, etc. y el impacto que puede tener.

La adopción de energías renovables por parte de la minería, el tránsito hacia la electromovilidad y la adaptación al cambio climático suponen una transformación para el sector minero en la que se requiere la participación de profesionales de diversas disciplinas, no solo las distintas áreas de la ingeniería, sino también de las ciencias sociales y naturales. La cooperación y multidisciplinaria son cruciales en esta transformación.

Los ingenieros y las ingenieras en minas no debiesen limitar su conocimiento a lo que ocurre en la mina, sino que deberían entender qué significa hacer minería en Chile, según su cultura, geografía, etc. y el impacto que puede tener.

La crisis sanitaria que estamos experimentando hoy ha demostrado lo importante que es la cooperación y atacar un problema desde diferentes perspectivas. El cambio climático puede ser también asumido como una emergencia, que también requiere que hayan cambios tan importantes como los que se están haciendo para luchar contra el COVID-19, que modifica la forma de cómo nos organizamos y colaboramos.

La transformación como enfoque de políticas públicas

En la COP, el discurso solía enfocarse en la reducción de emisiones de GEI, sin embargo, la aparición del presupuesto de carbono ha permitido llegar a un consenso sobre lo urgente que es ser carbono neutral. La producción, los patrones de consumo y nuestro estilo de vida deben ser cambiados de tal forma que las emisiones sean reducidas a un mínimo en las próximas décadas. En términos de impacto, esto es comparable con las dos transformaciones que ha vivido la humanidad: la Revolución Neolítica y la Revolución Industrial (German Advisory Council on Global Change, 2011).

En este contexto, podemos hacer la distinción entre adaptación y transformación. La primera ocurre cuando los impactos del cambio climático, su incertidumbre y complejidad son de una menor magnitud, por lo que los sistemas no experimentan cambios profundos; mientras que la segunda es necesaria cuando los impactos son de mayor magnitud y requiere cambios que transforman totalmente un sistema (Aldunce, 2019). Según el Prof. Rodrigo Palma, este concepto se puede aplicar a la mi-



Dada la crisis climática que acontece, debemos impulsar una transformación para poder adaptarnos.

nería, ya que en el diseño y planificación de la operación de una mina, no se debería abordar por separado la adaptación y luego la mitigación, sino que debería adoptarse una perspectiva de diseño para la transformación, donde sea posible abordar de manera estructural los cambios que será necesario implementar.

Para esto es necesario un cambio de mentalidad, imaginar lo unimaginable y pensar cómo podemos hacer las cosas de una manera distinta. Esto va más allá de los cambios tecnológicos; la transformación necesita cambios de la sociedad, de la economía, etc. (Aldunce, 2019).

Entonces, dada la crisis climática que acontece, debemos impulsar una transformación para poder adaptarnos. Puesto que la minería

es—en muchos casos—la base para generar tecnologías limpias que nos ayudarán en este proceso, es importante que se haga de forma sustentable. El estallido social que comenzó en Chile en octubre de 2019¹⁸, ha demostrado que la ciudadanía ya no se conformará con medidas puntuales que solucionen problemas específicos, sino con medidas que apunten a una transformación de nuestra sociedad. En vez de percibir esto como un obstáculo para el desarrollo de la minería en Chile, debiésemos verlo como una oportunidad para generar una nueva minería, más responsable con el medio ambiente y pionera en este proceso transformador, logrando convertirse en un ejemplo a nivel internacional para muchos sectores productivos que, dada la contingencia, necesitan cambiar la forma en que hacen las cosas.

¹⁸ Revolución social que busca conseguir cambios que disminuyan la desigualdad social en el país.

Referencias

Aldunce, P. (2019). Co-building visions and actions for NDCs, exploring transformation. En COP 25. *Chilean Pavilion*. Madrid.

Alstom. (2019). RMV's subsidiary fahma orders the world's largest fleet of fuel cell trains from Alstom. Obtenido de <https://www.alstom.com/press-releases-news/2019/5/rmvs-subsi-dary-fahma-orders-worlds-largest-fleet-fuel-cell-trains>.

Anlauf, A. (2015). ¿Secar la Tierra para Sacar Litio?: Conflictos Socio-Ambientales en la Minería del Litio. En F. Nacif & M. Lacabana (Eds.), *ABC del Litio Sudamericano: Soberanía, Ambiente, Tecnología e Industria*. Buenos Aires.

Banco Mundial. (2019). Climate-Smart Mining: Minerals for Climate Action. Obtenido de <https://www.worldbank.org/en/topic/extractiveindustries/brief/climate-smart-mining-minerals-for-climate-action>.

BBC. (2019a). Efectos del invierno altiplánico en Chile: la catástrofe en el norte del país que dejó al menos 6 muertos. Obtenido de

<https://www.bbc.com/mundo/noticias-america-latina-47181881>.

BBC. (2019b). Vale: The pride of Brazil becomes its most hated company. Obtenido de <https://www.bbc.com/news/business-47056849>

Bureau of International Recycling. (2008). *Report on the Environmental Benefits of Recycling*. October.

Cámara de Diputados de Chile. (2019). Sugieren Reducción del Plazo de Cierre de las Termoeléctricas en el Marco del Plan de Descarbonización. Obtenido de https://www.camara.cl/prensa/noticias_detalle.aspx?prmid=138095.

Cantallopts, J. (2019). Minería en Chile Y Desarrollo Económico: La oportunidad de la cadena de valor. Obtenido de [https://www.cochilco.cl/Presentaciones/cepal_encadenamientos\(3\).pdf](https://www.cochilco.cl/Presentaciones/cepal_encadenamientos(3).pdf).

CEGA. (2017). Geotermia en Chile. Obtenido de <http://www.cega-uchile.cl/informacion-de-interes/geotermia-en-chile/>.

Center for Climate and Resilience Research. (2018). ¿Qué tan vulnerable es Chile al cambio climático? Obtenido de <http://www.cr2.cl/wp-content/uploads/2018/12/Gigantografías-metro-Valparaíso-1.pdf>.



Center for Climate and Resilience Research. (2020). *Estado del clima y eventos extremos del año 2019*. Obtenido de <http://www.cr2.cl/wp-content/uploads/2020/01/Eventos-extremos-2019.jpg>.

CEPAL. (2012). *La Economía del Cambio Climático en Chile*.

Climate Action Tracker. (2021a). The CAT Thermometer. Obtenido de <https://climateactiontracker.org/global/cat-thermometer/>.

Climate Action Tracker. (2019b). Chile. Obtenido de <https://climateactiontracker.org/countries/chile/>.

CNE. (2018). *Anuario Estadístico de Energía 2017*. Santiago.

COCHILCO. (2016a). *Informe de actualización de emisiones de gases de efecto invernadero directos en la minería del cobre al año 2015*.

COCHILCO. (2016b). *Informe sobre las emisiones indirectas de gases de efecto invernadero al 2015*.

COCHILCO. (2018a). *Informe de actualización del consumo energético de la minería del cobre al año 2017*.

COCHILCO. (2018b). *Mercado Internacional del Litio y Su Potencial en Chile*.

COCHILCO. (2018c). *Proyección del consumo de energía eléctrica en la minería del cobre 2018-2029*.

COCHILCO. (2019a). *Anuario de Estadísticas del Cobre y Otros Minerales 1999-2018*. [Base de Datos]. Obtenido de <https://www.cochilco.cl/Paginas/Estadisticas/Publicaciones/Anuario.aspx>

COCHILCO. (2019b). *Producción Cobre de Mina por Empresa (Anual)*. Obtenido de <https://www.cochilco.cl/Paginas/Estadisticas/Bases de Datos/Producción-Minera.aspx>.

COCHILCO. (2020). *Producción cobre de mina por empresa (mensual)*. Obtenido de <https://www.cochilco.cl/Paginas/Estadisticas/Bases de Datos/Producción-Minera.aspx>.

Díaz-Ferrán, G., Haas, J., Chudinzow, D., Moreno-Leiva, S., Pamparana, G., Eltrop, L., Palma-Behnke, R. Kracht, W. (2019). *Carpe Solem: Solar Mining Opportunities for Chile: A review from science*.

EIT RawMaterials. (2019). EIT RawMaterials Circular Economy. Obtenido de <https://eitrawmaterials.eu/events/spring-school-on-circular-economy/>.

El Mercurio. (2019). Científicos advierten sobre veloz avance de la desertificación, que ya está llegando a Santiago. Obtenido de <https://www.emol.com/noticias/Nacional/2019/10/05/963328/Avance-desertificacion-Santiago.html>.

EMOL (2020). Sala de la Cámara aprueba en general proyecto que busca adelantar al 2025 el fin de las plantas a carbón. Obtenido de <https://www.emol.com/noticias/Economia/2020/10/27/1001974/Sala-aprueba-fin-plantas-carbonadelantar.html>.

Energía Llaima. (2015). Pampa Elvira Solar. Obtenido de <http://www.ellaima.cl/operaciones>.

European Copper Institute. (2012). *Copper's Contribution to a Low-Carbon Future: A Plan to Decarbonise Europe by 25 Percent.*

Eurostat. (2020). Circular economy – Overview. Obtenido de <https://ec.europa.eu/eurostat/web/circular-economy>.

FAO. (2016). *Greenhouse Gas Emissions from Agriculture, Forestry and Other Land Use.*

Fundación Chile. (2016). *Desde el Cobre a la Innovación: Roadmap Tecnológico 2015-2035.* Santiago.

German Advisory Council on Global Change. (2011). *World in Transition: A Social Contract for Sustainability.* Berlin: German Advisory Council on Global Change (WBGU).

Grosjean, C., Herrera Miranda, P., Perrin, M., & Poggi, P. (2012). Assessment of world lithium resources and consequences of their geographic distribution on the expected development of the electric vehicle industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(3), 1735–1744.

Hall, D., & Lutsey, N. (2018). *Effects of battery manufacturing on electric vehicle life-cycle greenhouse gas emissions.* *The International Council on Clean Transportation (ICCT).*

Heselaars, T., & Díaz, C. (2019). Científicos nacionales aterrizan el impacto en Chile del informe sobre el aumento en el nivel del mar. Emol. Obtenido de <https://www.emol.com/noticias/Tecnologia/2019/09/25/962245/aumento-nivel-mar-crisis-climatica.html>.



Hund, K., La Porta, D., Fabregas, T.P., Laing, T., Drexhage, J. (2020). Minerals for Climate Action: The Mineral Intensity of the Clean Energy Transition, World Bank.

Institute of Scrap Recycling Industries. (2018). *Facts and Figures Fact Sheet - Recycling*.

International Copper Association. (2017). *Copper Recycling*.

International Copper Association. (2019). How will the future copper demand be met? Obtenido de <https://copperalliance.org.uk/coverage-future-copper-demand/>.

International Council on Mining & Metals. (2013). Adapting to a Changing Climate: Implications for the Mining and Metals Industry. Climate Change.

International Energy Agency. (2018). Nordic EV Outlook 2018: *Insights from Leaders in Electric Mobility*.

IPCC, (2018). Summary for Policymakers. En: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the

context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. In Press.

IPCC. (2013). Summary for Policymakers. En: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

KAS Ingeniería. (2019). *Estudio Prospectivo Escenario de Descarbonización 2030*.

Kirk, T., & Lund, J. (2018). *Decarbonization Pathways for Mines: A Headlamp in the Darkness*.

Kreft, S., Eckstein, D., & Melchior, I. (2017). Global Climate Risk Index 2017: Who Suffers Most From Extreme Weather Events? Weather-related Loss Events in 2015 and 1996 to 2015. German Watch.

Liu, W., Agusdinata, D. B., & Myint, S. W. (2019). Spatiotemporal patterns of lithium mining and environmental degradation in the Atacama Salt Flat, Chile. *Int J Appl Earth Obs Geoinformation*, 80, 145–156.

MCC. (2020). That's how fast the carbon clock is ticking. Obtenido de <https://www.mcc-berlin.net/en/research/co2-budget.html>.

Meller, P., & Salinas, B. (2019). Revolución Tecnológica 4.0 y Capital Humano: Una Mirada Desde la Minería. *Serie de Estudios Sobre Minería, Tecnología y Sociedad*, Beauchef M.

Minería Chilena. (2019). Cambio Climático: El Nuevo «Factor Indeseado» que Amenaza la Minería.

Ministerio de Transporte. (2019). Presidente Piñera inicia operación de 183 nuevos buses eléctricos e inaugura primer electroterminal de Latinoamérica. Obtenido de <http://mtt.gob.cl/archivos/22634>.

Ministerio del Medio Ambiente. (2018). *Tercer Informe Bienal de Actualización de Chile sobre Cambio Climático*.

Mitchell, B. P. (2019). Will electrification spark the next wave of mining innovation? Obtenido

de https://www.ey.com/en_us/mining-metals/will-electrification-spark-the-next-wave-of-mining-innovation.

Molina, C., & Lagos, M. (2019). *Evaluación Hidrometeorológica de la Ocurrencia de Aluviones Incorporando Proyecciones del Cambio Climático en la Cuenca de los Ríos el Carmen y el Tránsito, Chile*. Universidad de Chile.

Moore, P. (2018). Sandvik DD422iE units helping Goldcorp achieve first all-electric mine at Borden. *International Mining*. Obtenido de <https://im-mining.com/2018/02/13/sandvik-dd422ie-units-helping-goldcorp-achieve-first-electric-mine-borden/>.

Morata, D. (2018). Geotermia: una oportunidad para el desarrollo de una minería más sostenible. En *Coloquio Energía y Minería*. (Beauchef Minería).

Moreno-Leiva, S., Díaz-Ferrán, G., Haas, J., Telsnig, T., Díaz-alvarado, F. A., Palma-Behnke, R., Kracht, W., Román, R., Chudinzow, D., Eltrop, L. (2017). Towards solar power supply for copper production in Chile: Assessment of global warming potential using a life-cycle approach. *Journal of Cleaner Production*, 164, 242–249.



National Oceanic and Atmospheric Administration. (2019). The NOAA Annual Greenhouse Gas Index (AGGI). Obtenido de <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi/aggi.html>

Nelson, J., & Schuchard, R. (2011). Adapting to Climate Change: A Guide for the Mining Industry. *Business for Social Responsibility*, 10.

Oliveira, D. (2017). Supply Shortfall: Tech Metals Supply Lagging Demand as Electric Car Production Increases. *Mining Weekly*. Obtenido de https://m.miningweekly.com/article/tech-metals-supply-lagging-demand-as-electric-car-production-increases-2017-03-10/rep_id:3861.

ONU. (2019). Cambio Climático. Obtenido de <https://www.un.org/es/sections/issues-depth/climate-change/index.html>.

Pamparana, G., Kracht, W., Haas, J., Díaz-Ferrán, G., Palma-Behnke, R., & Román, R. (2017). Integrating Photovoltaic Solar Energy and a Battery Energy Storage System to Operate a Semi-autogenous Grinding Mill. *Journal of Cleaner Production*, 165, 273–280.

Pearce, T. D., Ford, J. D., Prno, J., Duerden, F., Pittman, J., Beaumier, M., Berrang-Ford, L., Smit, B. (2011). Climate Change and Mining in Canada. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 16(3), 347–368.

Pizarro, C. (2020). La sequía cumplió su amenaza. *La Tercera*. Obtenido de <https://www.latercera.com/pulso/noticia/la-sequia-cumplio-amenaza/986946/>

Rogelj, J., Shindell, D., Jiang, K., Fifita, S., Forster, P., Ginzburg, V., Handa, C., Kheshgi, H., Kobayashi, S., Kriegler, E., Mundaca, L., R. Sférian, y Vilariño, M. V. (2018). Mitigation Pathways Compatible with 1.5°C in the Context of Sustainable Development. En: *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. In Press.

Sandvik (2019) Electric Loaders. Obtenido de: <https://www.rocktechnology.sandvik/en/products/underground-loaders-and-trucks/electric-underground-lhds/>

Senado. (2019). Eficiencia Energética incluirá eliminación del registro, multas millonarias ante faltas gravísimas y la obligación de instituciones públicas de velar por el buen uso del recurso. Obtenido de <https://www.senado.cl/eficiencia-energetica-inclui-ra-eliminacion-del-registro-multas/senado/2019-08-28/155655.html>.

Sharma, V., Graaff, S. Van De, Loechel, B., & Franks, D. (2013). *Extractive Resource Development in a Changing Climate: Learning the lessons from extreme weather events in Queensland, Australia*.

Smits, M., Viesmans, D., van Zon, S., & Wood, M. (2015). When Social Responsibility Leads to Growth: The European Grocery Market. Boston Consulting Group. Obtenido de [https://www.bcg.com/publications/2015/sustainabi- lity-consumer-products-when-social-respon- sibility-leads-growth-european-grocery-mar- ket.aspx](https://www.bcg.com/publications/2015/sustainability-consumer-products-when-social-respon-sibility-leads-growth-european-grocery-mar-ket.aspx).

Tagliaferri, C., Evangelisti, S., Acconcia, F., Dome- nech, T., Ekins, P., Barletta, D., & Lettieri, P. (2016). Life Cycle Assessment of Future Electric and Hybrid Vehicles: A Cradle-to-grave Sys- tems Engineering Approach. *Chemical Enginee- ring Research and Design*, 112, 298–309.

Terlien, M. T. J. (1998). The Determination of Statistical and Deterministic Hydrological Landslide-triggering Thresholds. *Environmental Geology*, 35(2–3), 124–130.

Townley, B., Díaz, A., & Luca, R. (2018). *Evalua- ción de Potenciales Recursos Primarios o Subproduc- tos de Co y Mn en Chile*. CORFO & Advanced Mining Technology Center.

Tractebel. (2018). *Oportunidades para el Desarrollo de una Industria de Hidrógeno Solar en las Regiones de Antofagasta y Atacama: Innovación para un Sistema Energético 100% Renovable*. Comité Solar - CORFO.

Vargas, G., Pérez, S., & Aldunce, P. (2018) *Aluvio- nes y Resiliencia en Atacama: construyendo saberes so- bre riesgos y desastres*. (G. Vargas, P. Aldunce, & S. Pérez, Eds.) (1a ed.). Santiago: Social-Ediciones.

Vásquez, R., Salinas, F., & GIZ. (2019). *Tecno- logías del Hidrógeno y perspectivas para Chile* (2da Edición). Santiago.

World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development. (2013). *Technical Guidance for Calculating Scope 3 Emissions: Supplement to the Corporate Value Chain (Scope 3) Accounting & Reporting Standard*.

Beauchef Minería

Es una iniciativa de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile (FCFM). Su misión es ser un centro de pensamiento que cumpla funciones orientadoras y de apoyo a las políticas públicas en el ámbito minero. De esta forma, busca contribuir al aumento de la competitividad de la industria minera nacional, cooperar con el fortalecimiento y articulación de su ecosistema de innovación y posicionar las actividades de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas en el ámbito nacional e internacional.

Como parte importante de su quehacer, Beauchef Minería desarrolla estudios sobre temas de alto interés para la industria minera, los que dan cuenta de las actividades de I+D+i en minería de la Facultad.

Beauchef Minería cuenta con el apoyo de dos Centros y dos Departamentos de la FCFM: Departamento de Ingeniería de Minas, Departamento de Ingeniería Industrial, el Advanced Mining Technology Center y el Centro de Modelamiento Matemático. Con el objetivo de generar investigación multidisciplinaria y fomentar una relación interfacultad, estas áreas colaboran entregando sus conocimientos y experiencia para aportar al debate en temas relevantes para la minería.

Departamento de Ingeniería de Minas

Para el Departamento de Ingeniería de Minas, Beauchef Minería representa una plataforma que permite complementar nuestras competencias técnicas en minería y metalurgia con la participación en la discusión pública asociada al desarrollo de la actividad minera. Esta iniciativa ha permitido canalizar, de manera coherente y ordenada, el aporte de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas en estos temas.

Advanced Mining Technology Center (AMTC)

El Advanced Mining Technology Center busca generar investigación multidisciplinaria de clase mundial, transferir nuevas tecnologías y formar capital humano avanzado. Asimismo, AMTC apunta ser un colaborador relevante en la definición de políticas públicas para nuestro país, por esta razón, ser parte de Beauchef Minería nos permitirá avanzar en la vinculación de la labor académica en el marco de los desafíos de la industria minera y las necesidades de nuestra sociedad.

Centro de Modelamiento Matemático (CMM)

El Centro de Modelamiento Matemático ha sido un actor activo en la introducción de herramientas matemáticas y estadísticas sofisticadas para la modelación de procesos claves en la minería chilena y su transformación a la era digital. La iniciativa Beauchef Minería nos permite visibilizar y acelerar la adopción de nuestras tecnologías en la minería.

Departamento de Ingeniería Industrial

El Departamento de Ingeniería Industrial de la Universidad de Chile es pionero en la formación de Ingenieros Civiles Industriales y nuestros programas de postgrado son reconocidos a nivel nacional e internacional. El departamento destaca por su investigación aplicada y formación en economía y gestión, particularmente en el área de la minería.



Av. Beauchef N° 850, Santiago, Chile.
contacto@beauchefmineria.cl

<http://www.beauchefmineria.cl/>

ISBN: 978-956-19-1211-3

