

Chile tiene futuro desde sus territorios:
**MINERÍA VERDE PARA ENFRENTAR
LA EMERGENCIA CLIMÁTICA**

	Capítulo 1	
	Chile, líder mundial en minería verde	18
	Introducción	19
1.1	Contexto y definiciones básicas	19
1.2	¿Qué es la minería verde y por qué es una oportunidad?	24
1.3	Ejes estratégicos	28
	Capítulo 2	
	Descarbonización, acceso a mercados y desafíos tecnológicos	30
	Introducción	31
2.1	Ámbitos de acción	33
2.1.1	Acceso a mercados, regulaciones y desafíos de trazabilidad	33
2.1.2	Soluciones tecnológicas para una minería carbono neutral	37
2.1.3	Oportunidades para liderar el desarrollo de soluciones tecnológicas en carbono neutralidad	43
2.2	Metas	51
2.3	Inversiones e impactos	51
2.3.1	Estimación de inversiones	51
2.3.2	Encadenamientos y desarrollo productivo	52
2.3.3	I+D+i	54
2.3.4	Capital humano	55
2.4	Propuestas de proyectos estratégicos, innovación y barreras a superar	56
2.4.1	Generación de una plataforma para la trazabilidad	56
2.4.2	Propuestas asociadas a la descarbonización, trazabilidad, mercado eléctrico y almacenamiento	57
2.4.3	Propuestas asociadas al desarrollo de nuevas tecnologías y a la producción de hidrógeno verde	59
2.4.4	Consideraciones socioculturales y de aceptación social	63
2.4.5	Otras consideraciones	64
	Capítulo 3	
	Recurso hídrico y adaptación al cambio climático	66

	Introducción	67
3.1	Ámbitos de acción	68
3.1.1	Disponibilidad de agua: desalación, agua continental, aguas grises y recarga artificial	72
3.1.2	Adaptación al cambio climático en operaciones mineras	73
3.1.3	Eficiencia en el uso de agua en el contexto de cambio climático	74
3.2	Metas	74
3.2.1	Ecosistemas relacionados con el agua	74
3.2.2	Gestión integrada de recursos hídricos (girh)	75
3.2.3	Calidad, cantidad de agua e infraestructura compartida	76
3.2.4	Adaptación al cambio climático	77
3.2.5	Eficiencia en el uso del agua en el contexto de cambio climático	78
3.3	Soluciones, tecnologías prioritarias y estratégicas	79
3.3.2	Otros requerimientos	82
3.4	Superación de barreras	87
3.4.1	Financiamiento	88
3.4.2	Socio culturales	88
3.4.3	Institucionales	89
3.5	Coordinación Capítulo 3	87
 Capítulo 4		
	Biodiversidad para operaciones mineras sostenibles	90
	Introducción	91
4.1	Ámbitos de acción	93
4.1.1	Componentes	93
4.1.2	Minería y biodiversidad en Chile	93
4.2	Superación de barreras	96
4.2.1	Fortalecer la institucionalidad ambiental en el más breve plazo	96
4.2.2	Biodiversidad, cambio climático, territorio y comunidades	98
4.3	Metas	99
4.3.1	I+D+i	101
4.3.2	Gobernanza y plataformas de conocimiento	102
4.4	Coordinación capítulo 4	102
 Capítulo 5		
	Procesamiento de concentrado, minería secundaria, reciclaje y pasivos ambientales	104

	Introducción	104
5.1	Ámbitos de acción	107
5.1.1	Relaves	107
5.1.2	Minería secundaria	110
5.1.3	Generar nuevas fundiciones	113
5.2	Metas	116
5.2.1	Relaves	116
5.2.2	Minería secundaria y economía circular	117
5.2.3	Generar nuevas fundiciones	117
5.3	Soluciones tecnológicas	118
5.3.1	Relaves	118
5.3.2	Minería secundaria y economía circular	120
5.4	Estimación de inversiones	120
5.4.1	Relaves	120
5.4.2	Minería secundaria y economía circular	124
5.4.3	Generar nuevas fundiciones	125
5.5	Superación de barreras	127
5.5.1	Relaves	127
5.5.2	Generar nuevas fundiciones	128
5.6	Coordinación capítulo 5	129
 Capítulo 6		
	Financiamiento de proyectos estratégicos e impulso a la innovación en minería verde	130
	Introducción	131
6.1	Introducción	132
6.1.1	Situación de Chile en I+D+i	134
6.1.2	Características del ecosistema de innovación en minería	136
6.1.3	Minería verde: una oportunidad única	139
6.2	Propuestas para fortalecer el financiamiento en el ciclo de innovación y el capital humano en el ecosistema minero	142
6.2.1	Promover el uso del impuesto específico a la minería de forma mayoritaria a I+D+i	142
6.2.2	Creación de un fondo de innovación del ecosistema minero	143
6.2.3	Fondo para bienes públicos y bienes club, centros tecnológicos e investigación tecnológica precompetitiva asociativa para desafíos colectivos del sector	144

6.2.4	Fondo de subsidio contingente a la innovación para validación industrial de tecnologías para la minería	149
6.2.5	Fondo de formación e inserción de capital humano avanzado en el ecosistema minero	151
6.2.6	Apalancamiento de capital privado para la inversión en I+D+i en minería verde	158
6.3	Propuestas para fortalecer el financiamiento de proyectos estratégicos de inversión en minería verde	163
6.3.1	Mecanismos de financiamiento para inversiones productivas en minería verde con apoyo público	163
6.4	Modelos y nuevos instrumentos para proyectos colaborativos que permitan capturar sinergias y economías de escala	169
6.4.1	Agua y desalación	170
6.4.2	Energía y descarbonización, mercado eléctrico y almacenamiento	172
6.4.3	Hidrógeno verde – valles de hidrógeno	173
6.4.4	Incentivos para integrar la innovación en los proyectos de inversión	174
6.5	Propuestas de marco institucional para la implementación y financiamiento de la estrategia de minería verde	177
6.5.1	Marco conceptual para el diseño de una gobernanza efectiva	177
6.5.2	Propuesta de gobernanza e institucionalidad para el financiamiento de la minería verde	181
6.6	Coordinación capítulo	185
Capítulo 7		
	Conclusiones	186
Anexos		
A.1	Identificación de residuos	202
Anexos		
A.2	Definición de escenarios	203
Anexos		
A.3	Apunte metodológico	204
Agradecimientos		
		208

“Este documento nace a través de una iniciativa de la Comisión Desafíos del Futuro, Ciencia, Tecnología e Innovación del Senado, coordinado con el Congreso Futuro y el Centro de Estudios del Cobre y la Minería (CESCO). Agradecemos a todas y todos quienes participaron en la creación de este documento. Especialmente a Alejandra Wood, ex Directora Ejecutiva de CESCO, y Osvaldo Urzúa, Director de CESCO, por la articulación de los grupos de trabajo y la coordinación de estos”.

“En lugar de centrarnos en pisar el acelerador, tenemos que pensar en la dirección. La economía es una enorme máquina de descubrir innovaciones y el gobierno puede hacer que parte de ese esfuerzo se focalice en ciertos temas para que las cosas salgan mejor para todos. Hoy, el verdadero reto es definir los temas que determinan la dirección correcta¹”

Paul Romer | Premio Nobel de Economía 2018.

1. Entrevista a Paul Romer realizada el 26 de octubre de 2018. Disponible en www.marketplace.org

Nuestro presente se ha visto alterado de un momento a otro, en muy poco tiempo, a causa de diferentes desafíos a nivel planetario: nos tocó enfrentar una pandemia, guerra, inflación e, imperativamente, la protección del medio ambiente.

Estos retos han convocado a líderes mundiales -de todos los sectores-, intelectuales públicos, tomadores de decisiones influyentes, pensadores y académicos a colaborar en la búsqueda de soluciones. No cabe duda que la realidad latente es que existen diversas interrogantes respecto al futuro, sin embargo, lo incuestionable es que la incertidumbre llegó para quedarse, al punto de transformarse en una característica permanente de la sociedad contemporánea. Y lo evidente, es que la revolución tecnológica avanza cada vez más rápido dejando obsoleta, incluso, la novedad de hace tan solo un tiempo atrás.

En ese sentido, las nuevas tecnologías e innovaciones al servicio de un mejor ecosistema han promovido la idea fuerza de "minería verde", una línea de acción que busca desde las regulaciones mineras mejorar significativamente la eficiencia minera y reducir el impacto ambiental.

En general, las técnicas mineras se vuelven mucho más sensibles al medio ambiente cuando se mejora la eficiencia, porque se producen menos desechos. Sin embargo, se deben realizar mejoras aún mayores y significativas, como están planteadas en el presente libro, pues tenemos como país un gran potencial a nivel mundial.

Pues cabe señalar que, Chile es el primer productor de cobre a nivel mundial, la minería verde, con bajas emisiones, uso de energías renovables, utilización de agua desalada, adecuado manejo de relaves y residuos tóxicos, implementación de minería secundaria y desarrollo de fundiciones de hidrógeno, podría -en consecuencia- permitir la transición energética mundial, proveyendo el cobre para toda la electromovilidad mundial, colaborando así a disminuir las emisiones de CO₂ en el planeta.

Por lo tanto, adentrarse en lo expuesto en este libro, es también sensibilizarse con la responsabilidad ética de Chile con la humanidad, donde tenemos una ventaja comparativa y una oportunidad inédita en nuestra historia.

No cabe duda que los países que no sean capaces de transitar hacia una minería verde serán interpelados a reducir su producción, ya que serán discriminados por los mercados y sociedades. Adicionalmente, la capacidad de retener parte del valor producido podría erosionarse, si los mercados establecen tasas diferenciadas a la importación de minerales según su huella socioambiental, y si no se participa activamente en la generación de las soluciones que demanda una minería verde.

Por lo tanto, es este camino una posibilidad de estar a la vanguardia medioambiental, para esto, se presentan 5 ejes de acción estratégicos asociados a desafíos indispensables que debe abordar la minería verde en nuestro país, y que da cuenta de cada capítulo desarrollado en este documento: Eje 1: Descarbonización, acceso a mercados y desafíos tecnológicos; Eje 2: Recurso hídrico y adaptación al cambio climático; Eje 3: Biodiversidad para operaciones mineras sostenibles; Eje 4: Procesamiento de concentrados, minería secundaria y reciclaje y pasivos ambientales; Eje 5: Financiamiento de proyectos estratégicos y de impulso a la innovación.

Finalmente, mencionar que esto es el resultado del trabajo colaborativo "Chile tiene futuro desde los territorios", que ha convocado a más 800 académicos, científicos, emprendedores y a la sociedad civil en su conjunto para prospectar un mejor futuro para nuestro país. Hemos trabajado en más de 15 comisiones temáticas, con bajadas concretas para la elaboración de políticas públicas y mejoramiento en regulaciones legislativas. Así mismo lo ha hecho la comisión de Minería Verde, que expone magistralmente desafíos de enormes proporciones para el país, y propuestas que los abordan. Por lo tanto, cierro estas palabras dedicando mis agradecimientos y reconocimiento a cada integrante de este trabajo, con más de 150 participantes que trabajaron al servicio de Chile, de la humanidad y del bien social, bajo la lógica de transformar a nuestro país en el centro mundial de la producción de cobre verde para el futuro planetario, pensamos en un mejor futuro actuando hoy.

Senador Francisco Chahuán

La vocación minera que la naturaleza le otorgó a Chile, única en todo el planeta, no es sólo una gran oportunidad de negocio o el sueldo de Chile, sino que representa un deber ético con la humanidad, que enfrenta una emergencia climática que amenaza con la extinción masiva de buena parte de los seres vivos que habitan la Tierra.

En la urgente tarea de desechar el uso de combustibles fósiles -descarbonizar- para ralentizar el cambio climático, es evidente la necesidad de transitar hacia la electromovilidad, con vehículos construidos con más cobre, impulsados por hidrógeno verde, así como dispositivos que requerirán crecientemente baterías de litio. Paradojalmente, en vez de aumentar nuestra producción de cobre, la estamos disminuyendo por falta de visión estratégica, ausencia de incentivos, y obsolescencia de las instituciones gubernamentales, con criterios de mercado inmediatistas y lo que parece una incapacidad histórica de agregar valor al mineral.

Estamos extrayendo una fracción menor del litio disponible. Según las proyecciones científicas, la alta demanda de litio se sostendrá por 20 años, que debemos aprovechar para incorporar recursos adicionales al erario nacional y a las políticas públicas a partir de esta explotación minera. Es una ventana que debemos aprovechar, cosa que no estamos haciendo.

Asimismo, debemos llegar al 2035 con una industria de hidrógeno verde madura, nos sólo por ser un buen negocio, sino que es fundamental que Chile realice la contribución a la humanidad que le corresponde a un territorio privilegiado para la generación de una de las mayores posibilidades de reemplazo de los combustibles fósiles. Tanto en el norte del país, así como en la Patagonia que puede ser el chasis mundial para los data center y nubes de almacenamiento para sostener la civilización digital.

Hoy Chile tiene el desafío mayor de reactivar su economía. En un tiempo en que habitamos la incertidumbre, debemos generar certezas en áreas relevantes para el futuro, para nuestra minería para la electromovilidad del planeta, usar nuestros mares para alimentar el mundo y que el norte del país sea centro mundial de Data Center.

El Estado de Chile debe acortar los plazos y trámites que nos

impiden movernos a una velocidad competitiva y puede dar seguridad a todos los actores involucrados si empaqueta proyectos: El estado puede encontrar los mejores terrenos, hacer los estudios de irradiación y geológicos, los estudios de impacto ambientales, las consultas indígenas y luego asociarse con empresas para que ellas sólo gestionen acortando los plazos y generando certezas.

Hoy la actividad minera es percibida mucho más como una amenaza que un beneficio, hay sectores sociales que sostienen que la renta del capital natural -no renovable- queda en pocas manos o que, en vez de generar riquezas y encadenamiento productivo con los territorios, sólo provoca un grave deterioro ambiental.

Necesitamos recuperar la confianza en la minería y su valor simbólico en el corazón de los chilenos y chilenas. Para ello es urgente que la minería verde sea vista como una actividad altruista, al servicio del planeta, del país y, además, ambientalmente ecológica y sustentable, es decir que no produzca daños colaterales.

¿Cómo se logra esto? Con una mayor vinculación con los territorios, sus habitantes y sus necesidades. La minería puede ser un factor coadyuvante para generar políticas beneficiosas como, por ejemplo, desalar agua de mar no sólo para su funcionamiento propio, sino que también para abastecer a las comunidades cercanas. Una minera como Anglo American podría proveer del vital elemento a las comunas más desprovistas de las regiones Metropolitana y de Valparaíso.

Para ello es necesario generar incentivos tributarios u de otro tipo que impulsen una buena relación entre las empresas y sus vecinos, así como añadir valor agregado al material extraído. No es aceptable que exportemos concentrado de cobre y luego lo importemos convertido en alambre.

La MV puede ser un factor catalizador del futuro, pues sus enormes camiones, que requieren una gran cantidad de energía, podrían usar un 80% de HV en sus motores. Al mismo tiempo se deben desarrollar fundiciones solares o a hidrógeno, en vez de combustibles fósiles, para tratar los concentrados en Chile y

a futuro hacer reciclaje y así recuperar las tierras raras y otros metales valiosos.

Los minerales chilenos serán esenciales para el desarrollo de la inteligencia artificial (IA) que requerirá gigantescas cantidades de energía, así como cobre y litio y otros minerales para las placas madre de teléfonos, computadores y para la transmisión eléctrica para abastecer todos los data center y nubes del mundo que sostengan el futuro chasis digital.

Necesitamos una MV que trate los relaves con tecnologías de biorremediación, cuyo desarrollo e implementación puede ser tan valioso como el propio mineral. Y que, a su vez, involucre activamente a la IA para poder impulsar una actividad más segura y con menos impacto ambiental.

El conjunto de estas acciones puede hacer que la minería sea percibida como una actividad fundamental para la humanidad, un buen negocio para Chile y vuelva a estar en el corazón de los chilenos y chilenas.

Con esos desafíos, en la mesa de Minería Verde de la Comisión Desafíos del Futuro, Ciencia, Tecnología e Innovación y la Fundación (FEF) reunimos a la izquierda y la derecha, científicos, académicos, mundo privado y públicos, representantes de la industria y de la ciudadanía organizada, tanto regionales como nacionales, para pensar una estrategia sustentable de desarrollo de esta importante actividad productiva nacional.

Agradecemos la dedicación de tiempo y pensamiento por parte de todos los miembros de esta mesa, que nos indica potentes lineamientos para una Estrategia de Minería Verde.

En consonancia con este esfuerzo, se requiere también de políticas públicas inteligentes y marcos regulatorios actualizados, que permitan que la nueva minería pase de ser un mal necesario -por los recursos que inyecta a la economía- a convertirse en un motor efectivo de desarrollo de los territorios y de sus comunidades, aportando sustantivamente al bienestar planetario.

Estamos en un momento fundamental para definir si a futuro seremos espectadores de la lucha por la hegemonía del

ciberespacio entre Estados Unidos y China como las únicas superpotencias en el planeta o -como ocurrió con los países exportadores de petróleo el siglo pasado- nos podemos convertir en actores relevantes para el futuro porque la producción de energía verde y el hidrógeno, los minerales y la alimentación desde los mares serán los factores limitantes en esta disputa geopolítica. Chile los tiene y puede contribuir al bienestar de la humanidad y conservar nuestra soberanía.

Ex senador Guido Girardi
Vicepresidente de Fundación Encuentros del Futuro
Congreso Futuro

Al recibir la invitación desde el Congreso Futuro para participar en el documento Minería Verde, nos inspiró la posibilidad de proponer un conjunto de iniciativas para que Chile, que es hoy un líder mundial en la minería del cobre, se convierta además en un ejemplo de minería responsable.

El cobre y el litio son considerados entre los minerales críticos para la transición energética a nivel global para disminuir la dependencia de combustibles fósiles, tan necesario para combatir la crisis climática. Debido a esto, las proyecciones apuntan a un aumento considerable en la demanda de estos minerales.

Entendiendo lo anterior, la mayor contribución que Chile puede hacer a los esfuerzos globales en el combate del calentamiento global, es precisamente más y mejor minería. Producir más cobre, más litio, más minerales, pero mediante una minería cuidadosa de su huella socioambiental, activa impulsora de la creación de capacidades locales y formas de relacionamiento necesarios para un desarrollo y crecimiento sostenible. Estos atributos definen la aspiración de la minería verde.

Pero estos no son los primeros esfuerzos del sector minero para avanzar en esta línea. Al trabajo que hemos desarrollado junto a la Comisión de Desafíos del Futuro del Senado, se suma lo ya realizado por instituciones como Alta Ley con su hoja de ruta sobre oportunidades y desafíos de la minería verde en Chile, y más recientemente, la Política Nacional Minera 2050, liderada por el Ministerio de Minería y que convocó a un grupo amplio del ecosistema minero.

El documento que se presenta a continuación convocó a más de 150 personas de la academia, sector público y privado, consultoras, y representantes de distintos grupos para examinar la naturaleza de los desafíos de una minería verde y definir políticas y regulaciones, las que junto con profundizar lo ya propuesto en la Política Nacional Minera 2050, acelere y amplíe los avances en materia de minería verde que se han estado impulsando.

En un trabajo de más de un año, en el que se desarrollaron temas relacionados a descarbonización, agua, biodiversidad, procesamiento de concentrados, minería secundaria, reciclaje, pasivos ambientales, y financiamiento de proyectos estratégicos e impulso a la innovación, se llevaron a cabo foros virtuales por temática, así como foros ampliados para una visión integrada.

Los resultados obtenidos de estos grupos de trabajo nos muestran la importancia y el camino para que en Chile, exista un fuerte impulso al I+D+i, atracción de inversión de calidad, un imperante fortalecimiento institucional y un esfuerzo significativo en la formación de capital humano.

Agradecemos sinceramente a todos los participantes de este grupo de trabajo por su valiosa contribución, que sin duda, es un aporte por la diversidad de disciplinas y miradas de personas provenientes del mundo académico, público y privado.

Alejandra Wood
Miembro de Cesco.

Oswaldo Urzúa
Director de Cesco Coordinadores.

CHILE, LÍDER MUNDIAL EN MINERÍA VERDE

El cambio socio-tecnológico y de época que vivimos presenta una oportunidad única para que Chile de un salto hacia un desarrollo sostenible, impulsado por una minería que, además de competitiva y segura, sea tecnológica, equitativa, y ambiental y socialmente responsable.

El desafío para Chile es proveer al mundo de cobre, litio y otros minerales, mediante un proceso que disminuya sus emisiones, minimice el consumo de agua continental, gestione sus desechos y residuos, cuide la biodiversidad en los ecosistemas donde opera y establezca relaciones de aprecio y beneficio mutuo con las comunidades vecinas y la sociedad, a través de una minería que genera empleos de calidad e impulsa el desarrollo de encadenamientos productivos, incluyendo nichos de alto valor.

El propósito de este trabajo es contribuir a establecer una nueva relación y conversación de Chile con su minería, convocada como un esfuerzo colectivo del país que reconoce su vocación minera. Esto implica alinear los distintos stakeholders de la industria con las necesidades y exigencias de la sociedad actual.

1.1 CONTEXTO Y DEFINICIONES BÁSICAS

La minería chilena está entre las mayores singularidades que tiene el país. La urgencia climática, la escala del sector minero chileno, la naturaleza de sus desafíos y el nivel de capacidades, conocimiento y experiencia presentes, brindan la oportunidad de liderar este tránsito y dar un salto de prosperidad y desarrollo.

A fines del siglo XIX, durante el gobierno del presidente Balmaceda, Chile enfrentó una situación similar y tuvo la oportunidad de sentar las bases para un crecimiento sostenible de largo plazo. Entonces, estaba en pleno despliegue la revolución tecnológica asociada a la electricidad, el acero y la ingeniería pesada (y la primera globalización). Se quiso aprovechar el auge del salitre para financiar la creación de las capacidades industriales necesarias para ser una economía avanzada. Lamentablemente, llegar a un acuerdo fue complejo y el desenlace, una tragedia.

¿Habremos aprendido la lección y sabremos aprovechar esta vez la oportunidad? Hoy, las condiciones para enfrentarla son auspiciosas, pues un mundo sostenible necesita minerales, en particular cobre y litio, los que deben producirse, comercializarse y usarse reduciendo significativamente los niveles de emisión (local y global) y los impactos socioambientales. Para lograrlo, la nueva minería, además de segura, ambientalmente sustentable y responsable con la sociedad, debe promover activamente la innovación tecnológica junto con establecer modelos equitativos de generación de valor y relaciones basadas en el aprecio y respeto mutuo. En otras palabras, una minería responsable que esté comprometida con el desarrollo productivo y tecnológico del país e integrado con las comunidades, a nivel local y nacional.

La oportunidad de posicionar el cobre chileno como uno de baja huella ambiental y social e impulsor de un desarrollo productivo y tecnológico equitativo ha

estado presente por más de una década en diferentes foros. Sin embargo, ha carecido de continuidad y liderazgo político.

Adicionalmente, inversionistas y mercados están presionando por cambios en la forma en que se producen los metales, de modo de garantizar a los usuarios finales la protección de derechos humanos, ecosistemas y baja huella de carbono a lo largo de toda la cadena de valor. La tendencia global de los mercados de metales es el establecimiento de esquemas de suministro responsable, que buscan que las compañías mineras y sus proveedores proporcionen evidencia verificable e independiente, con tal de demostrar qué minerales comercializados se han producido en zonas geográficas libres de conflicto, utilizando las mejores prácticas y estándares asociados a una producción responsable² y abordando los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de Naciones Unidas.

Conectar con la ciudadanía es otro desafío clave. Se habla de extractivismo y de falta de legitimidad social de la minería en forma recurrente. A su vez, para los gobiernos, estas afirmaciones son un problema en sí mismo: los países necesitan inversión, actividad económica, dólares de exportación e impuestos, pero en lo inmediato, necesitan el apoyo político ciudadano para desarrollar su acción.

Hoy emerge la posibilidad de una nueva mirada mutua entre la industria minera y el país: transitar desde la visión de enclave, propia del siglo XX -donde la minería era un actor lejano, auto sustentado y apenas relacionado con su entorno, y donde su vínculo principal con el país era su contribución a la balanza de pagos y de recursos al erario fiscal-, hacia una visión del siglo XXI. En lo referido a su contribución al país, la importancia de "las rentas", no desaparece, pero es correcta y adecuadamente ponderada bajo una mirada holística que integra los impactos de la minería -virtuosos o no tanto- en su ecosistema económico, socio ambiental, cultural y tecnológico.

2. London Metal Exchange (LME). Octubre 2018. Responsible Sourcing: LME position paper.

De esta manera, el juicio público respecto de la actividad minera, en general, se puede equilibrar; los gobiernos no necesitan gastar su capital político discutiendo si su prioridad es, en un extremo "la renta" o en el otro la "atracción de inversiones", y se avanza hacia una relación madura entre la ciudadanía y su principal actividad económica, aquella por la cual 'Chile cobre y mineral' es reconocido internacionalmente.

Es posible imaginar, además, más allá de los impactos sociopolíticos, ambientales y económicos, el potencial caudal creativo y virtuoso que podría generar un replanteamiento de la relación minería-país desde una mirada menos suspicaz y dramática, de mayor confianza, e incluso de mayor identidad con su "emblema productivo" a nivel global.

Para abordar estos desafíos existe una nueva oportunidad, respecto de la cual es necesario actuar de manera colectiva en torno a un propósito común: liderar el tránsito hacia la minería verde, acordando una visión y un camino común a seguir, a través del desarrollo de relaciones basadas en la reciprocidad, y el avance hacia el aprecio mutuo y la confianza entre distintos grupos de interés público, privado y la sociedad civil. Para ello, se debe partir por definir desafíos concretos en áreas estratégicas que sean movilizadoros de recursos e inversiones, y que aprovechen y fortalezcan las capacidades que exige una acción colectiva eficaz.

Este es el propósito del presente documento de trabajo, fruto de la colaboración de profesionales y académicos como también, de representantes del sector público que se reunieron durante 2021 bajo la convocatoria de la Comisión de Desafíos de Futuro, Ciencia, Tecnología e Innovación del Senado de la República.

Un resumen del mismo ha sido parte de la publicación "Chile tiene futuro desde sus territorios" de la misma comisión en el que se proponen reflexiones, y líneas de acción en áreas en las que Chile tiene ventajas

comparativas, que además de ser únicas en el mundo pueden responder a los retos que afronta la humanidad.

La invitación es a mantener este documento como un documento de trabajo que integra un espacio mayor de reflexión estratégica a disposición del Ejecutivo, el Parlamento, el mundo privado y la sociedad civil como un aporte a la generación de una visión común para Chile.

1.2 ¿QUÉ ES LA MINERÍA VERDE Y POR QUÉ ES UNA OPORTUNIDAD?

La minería no goza de buen prestigio a nivel global y la actividad es cada vez más difícil de realizar. Existe una mayor competencia por el uso de los territorios, y el acceso al recurso hídrico es cada vez más complejo en muchas de las regiones mineras, entre otros aspectos. Paradojalmente, el progreso y bienestar de la humanidad, junto a la necesaria transformación de la matriz energética para combatir el cambio climático, dependen fuertemente de la producción de minerales y metales. Por lo mismo, el mundo no está preparado para reducir el consumo de productos que contienen minerales y, en consecuencia, la reducción de la actividad minera no parece viable.

Un futuro cada vez más interconectado, basado en flujos de información y bajo en carbono será intensivo en el uso de minerales, ya que las tecnologías asociadas a la digitalización y las energías limpias los requieren. Si bien el reciclaje y reutilización de metales serán claves para una potencial reducción de emisiones, la producción primaria de minerales seguirá siendo necesaria para implementar tecnologías digitales y de bajas emisiones en las próximas décadas.

Entre estos minerales claves se encuentra el litio y el cobre: El primero es un insumo crucial de las baterías de iones de litio, que se utilizan desde los teléfonos inteligentes hasta vehículos eléctricos (EV), ahora sus mayores consumidores. La batería de iones de litio es la preferida por la mayoría de los fabricantes de automóviles, incluidos Tesla, BMW, Ford y Nissan. De acuerdo con un análisis del Banco Mundial, la producción global de minerales críticos utilizados en las tecnologías bajas en carbono proyecta que la demanda de litio aumentará en un 965%³.

El cobre, a su vez, es fundamental en los sistemas energéticos tradicionales, pero, sobre todo, en la generación en base a energías renovables y en la electrificación de sistemas. Tiene una conductividad térmica y eléctrica más alta que cualquier metal, reduce las pérdidas por transferencia de calor, mejora la eficiencia energética y es eternamente reciclable, sin deterioro de sus propiedades esenciales. Como resultado, puede reducir los costos operativos de por vida. En el caso de un auto eléctrico, este consume 5 veces más cobre que uno a combustión fósil⁴.

Hoy se apunta a una minería de baja huella socio ambiental, activa impulsora de la creación de capacidades locales y formas de relacionamiento necesarios para un desarrollo y crecimiento sostenible. Estos atributos definen la aspiración de la minería verde.

Los países mineros que no sean capaces de transitar hacia ese tipo de minería podrían verse enfrentados a reducir su producción, ya que los mercados y sociedades discriminarán entre un mineral de esas características y aquel que no lo es. Adicionalmente, la capacidad de retener parte del valor producido podría erosionarse, en caso de que los mercados establezcan tasas diferenciadas a la importación de minerales según su huella socioambiental, y si no se participa activamente en la generación de las soluciones que demanda una minería responsable.

3. Changing mining practices and greening value chains for a low carbon-world, Climate Smart Mining, The World Bank.

4. Minerals for Climate Action: The Mineral Intensity of the Clean Energy Transition, Climate Smart Mining, The World Bank.

De forma contraria, los países que lideren la transición hacia la minería responsable podrían incrementar la producción de minerales junto con impulsar una transformación productiva más profunda, que sea fuente de empleos de calidad, que desarrolle encadenamientos productivos cada vez más complejos, que aborde los desafíos de crecimiento con equidad, que abra espacios de diversificación y sofisticación productiva, que cuide el medioambiente y los ecosistemas, y respete las comunidades locales.

El término minería verde fue acuñado en Finlandia como una herramienta para posicionar a su industria minera como sustentable⁵. De manera general, propone promover el uso eficiente de recursos como el agua y la energía, de manera de reducir la huella ambiental a lo largo del ciclo de vida de los minerales, además de minimizar la generación de residuos a través de la recuperación y reutilización de estos. También, disminuir los impactos ambientales, recuperando el capital natural e ir más allá de solo evitar efectos sociales adversos a través de crear capital social y capacidades productivas y tecnológicas que permitan maximizar los beneficios locales⁶.

El término minería verde puede conducir a interpretaciones diversas, que van desde una generación de expectativas que podrían frustrarse, hasta una sensación, especialmente en los sectores más críticos de la actividad minera, de que el término esconde una intención de lavado de imagen. No obstante, su amplio uso invita a hacer un esfuerzo por caracterizar mejor, antes que proponer uno nuevo.

Para efectos de este documento, se entenderá por minería verde aquella que comprende los siguientes atributos, tomando en cuenta todas las etapas del proceso minero:

- Baja en emisiones locales y globales, y que se adapta al cambio climático.

- Baja en residuos, minimizando su generación e insertándose en sistemas de producción circulares.
- Que cuida la biodiversidad de los ecosistemas donde opera.
- Eficiente en el uso del agua, incluyendo el cuidado de ecosistemas que podrían verse afectados por los sistemas de extracción y uso de agua.
- Eficiente en el uso de la energía y uso intensivo de energías renovables de bajas emisiones.
- Impulsora de desarrollo de encadenamientos productivos o clusters, con especialización en nichos de alto valor y contenido tecnológico que desarrollan soluciones para la minería local y global.
- Inserta en los territorios, abriendo espacios para la participación de las capacidades locales en los procesos de creación de valor de una minería sostenible.

El desafío para Chile es proveer de cobre, litio y otros minerales, disminuyendo sus emisiones, utilizando menos agua continental, gestionando sus residuos y desechos y cuidando la biodiversidad en los ecosistemas donde opera, estableciendo relaciones de aprecio y beneficio mutuo con las comunidades vecinas y la sociedad, a través de una minería que genera empleos de calidad e impulsa el desarrollo de encadenamientos productivos, incluyendo nichos de alto valor.

Es imprescindible, además, profundizar la discusión en torno a las comunidades donde se desarrolla la actividad minera y los temas regulatorios que la atañen, los que son determinantes para fortalecer o debilitar las posibilidades de una minería que sea verdaderamente una columna vertebral de progreso y desarrollo para el país y sus regiones mineras.

5. Green Mining - A Holistic Concept for Sustainable and Acceptable Mineral Production. PEKKA A. NURMI Geological Survey of Finland, Espoo, Finland.

6. Minería Verde, Grecia Pérez de Arce.

El presente trabajo se refiere principalmente a la minería del cobre, y sería deseable que se desarrolle una propuesta similar, más en detalle, para el caso del litio y otros minerales, particularmente aquellos relevantes para la transición energética. La minería del cobre y la del litio son muy distintas y están regidas por marcos regulatorios diferentes, aunque suceden hasta un cierto punto en los mismos territorios, por lo que comparten ciertas problemáticas y desafíos.

1.3 EJES ESTRATÉGICOS

A continuación, se presentan 5 ejes de acción estratégicos asociados a desafíos fundamentales que debe abordar la minería verde en Chile y que corresponde, además, a los tópicos desarrollados en los siguientes capítulos de este documento:

Eje 1: Descarbonización, acceso a mercados y desafíos tecnológicos.

Eje 2: Recurso hídrico y adaptación al cambio climático.

Eje 3: Biodiversidad para operaciones mineras sostenibles.

Eje 4: Procesamiento de concentrados, minería secundaria, reciclaje y pasivos ambientales.

Eje 5: Financiamiento de proyectos estratégicos y de impulso a la innovación.

DESCARBONIZACIÓN, ACCESO A MERCADOS Y DESAFÍOS TECNOLÓGICOS

La minería chilena es una de las actividades con aporte significativo a las emisiones de GEI del país, las que alcanzan un 5,4% de manera directa (emisiones directas o Alcance 1), pero que se incrementan al 15% del total de emisiones del país cuando se contabilizan las emisiones indirectas, aguas arriba y debajo de la operación (emisiones indirectas o Alcance 2)⁸. Gran parte de las emisiones de CO₂ corresponden precisamente al consumo energético, que según datos de Cochilco, el consumo total de energía de la minería del cobre el 2018 fue equivalente a 49.000 GWh, dividido en aproximadamente un 47% combustibles y 53% electricidad.

Para desarrollar una industria minera carbono neutral, es clave impulsar un proceso de transición energética que, junto con disminuir emisiones, tenga un sistema de trazabilidad confiable, tarea no sólo de envergadura sino de gran complejidad.

El sector minero ha iniciado esfuerzos de reducción de emisiones focalizándose en un uso más eficiente de la energía y en el reemplazo de fuentes de combustibles fósiles por energías limpias. Actualmente, cerca de 2/3 del consumo del sector es abastecido por renovables, y se espera que al 2030 esto llegue al 90%⁹. El hidrógeno verde (HV) y la electromovilidad podrían jugar un rol clave. Chile se comprometió a alcanzar una descarbonización de la matriz energética al 2040, aunque se ha observado la factibilidad de adelantarlo al 2030.

8. COCHILCO. 2021. Emisiones de gases de efecto invernadero directos e indirectos en la minería del cobre al año 2020.

9. Minería Chilena. 2022. Minería Chilena: 66% del suministro eléctrico que recibe proviene de energías renovables.

2.1 ÁMBITOS DE ACCIÓN

Los mercados, los usuarios y la sociedad en general, están exigiendo en forma creciente que los minerales provengan de procesos que identifiquen, minimicen y mitiguen sus impactos socioambientales, a lo largo de toda su cadena de abastecimiento, y que lo anterior esté debidamente respaldado por mecanismos de verificación confiables e independientes.

Entender este desafío y sus oportunidades, fue el propósito del trabajo del Eje 1, que definió 3 ámbitos para abordarlo:

- Acceso a mercados, regulaciones y desafíos de trazabilidad.
- Soluciones tecnológicas para una minería carbono neutral.
- Oportunidades para liderar el desarrollo de soluciones tecnológicas en carbono neutralidad.

2.1.1 ACCESO A MERCADOS, REGULACIONES Y DESAFÍOS DE TRAZABILIDAD

Las preocupaciones socioambientales en torno a la producción de minerales se han reflejado en la proliferación de diversos estándares y regulaciones para visibilizar y dar trazabilidad a su huella socioambiental, los que son, cada vez más, un requisito de acceso a los mercados. No basta que las tecnologías limpias sean más bajas en emisiones, sino también, que las cadenas de abastecimiento de la industria minera y otros insumos utilizados provengan de fuentes limpias, entre otros aspectos.

Es así como ha surgido una nueva generación de estándares de sostenibilidad, muchos aún en desarrollo, donde las emisiones de Gases de Efecto Invernadero

(GEI), así como los impactos sobre la biodiversidad y el uso de agua, son claves. Estos estándares se suman a los temas de respeto a los Derechos Humanos, donde se han denunciado prácticas indeseables y reprochables como el trabajo forzado e infantil asociados a la producción de cobalto en la República Popular del Congo y los “diamantes de sangre” de la década pasada.

Las preocupaciones respecto a la sustentabilidad de las cadenas de valor de los minerales no solo han permeado a gobiernos y ONG, sino crecientemente a inversionistas y a los segmentos aguas abajo de las cadenas de valor de la minería. Empresas fabricantes de baterías, de vehículos y de electrónica, por ejemplo, implementan numerosas políticas para garantizar un abastecimiento responsable y minimizar riesgos reputacionales.

El contexto global requiere que todos los actores del sector minero reporten (compañías mineras, proveedores, gobiernos y universidades) y que sean capaces de trazar y gestionar su huella de carbono. Además del acceso a mercados, otros beneficios de la trazabilidad serían la diferenciación en el mercado de commodities y la posibilidad de acceder a mejores precios o premiums.

Trazabilidad en la cadena de valor

La minería chilena es una de las actividades con aporte significativo a las emisiones de GEI del país. Si bien en Alcance 1 (emisiones directas generadas por la operación interna de la faena) solo aporta el 5.4% del total - la minería de cobre contribuye con el 4,9% del total país- al considerar el Alcance 2 (emisiones indirectas asociadas a la energía eléctrica que utiliza la empresa), el aporte de la minería se incrementa al 15% del total de emisiones de GEI¹⁰. Pero, como se aprecia en la Ilustración 2, también están las emisiones de Alcance 3, aquellas indirectas, generadas por actividades de los proveedores aguas arriba y aguas abajo del proceso de extracción y procesamiento de minerales.

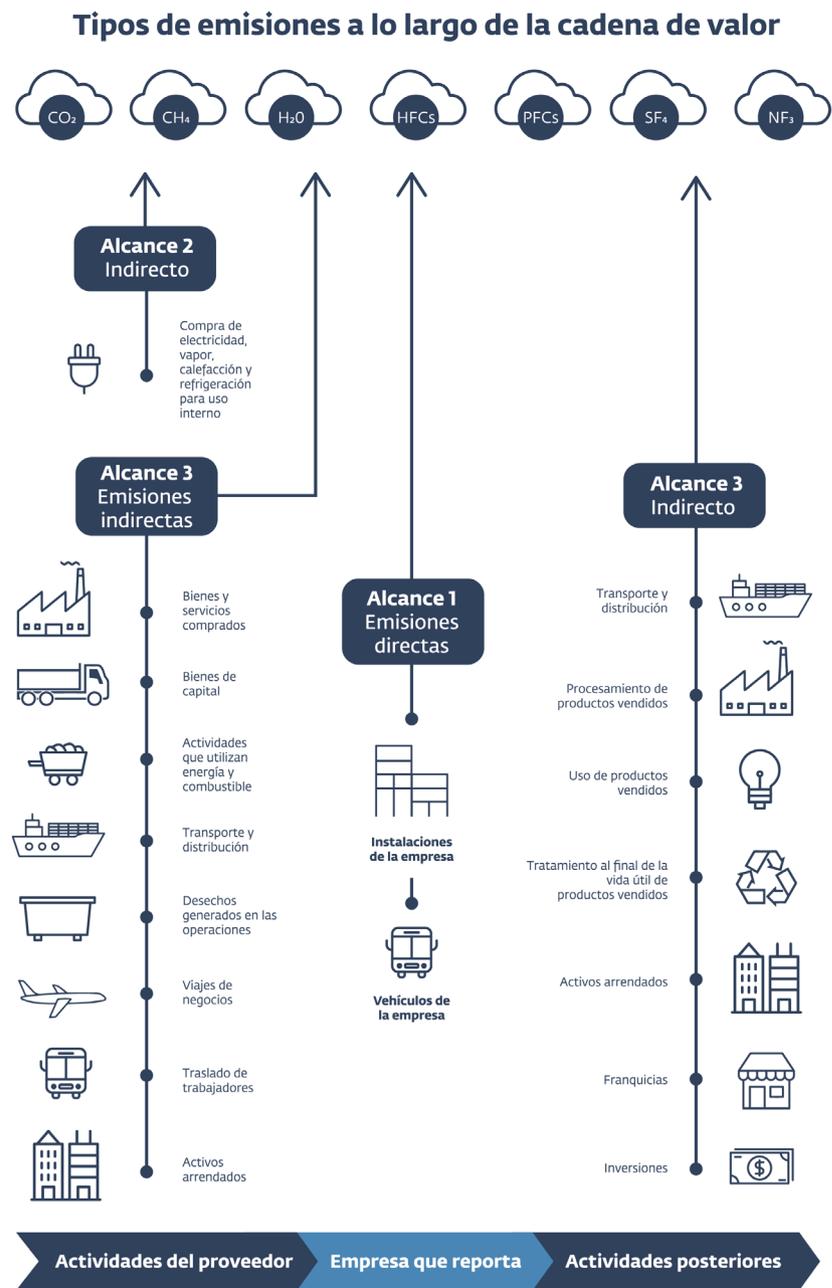


Ilustración 2: Emisiones a lo largo de la cadena de valor del proceso productivo minero.

10. COCHILCO. 2021. Emisiones de gases de efecto invernadero directos e indirectos en la minería del cobre al año 2020.

Para lograr una minería carbono neutral se deben abordar las emisiones directas y también las indirectas de Alcance 2 y 3. En Chile, algunas empresas mineras están informando las emisiones de Alcance 3 en sus reportes de sustentabilidad, sin embargo, a nivel nacional esta política recién está siendo asumida por el sector con la PNM 2050, sin embargo, tampoco existe una estandarización de la medición, que permita tener un balance integrado a nivel país y hacer comparaciones entre diferentes empresas. Adicionalmente, en las emisiones de Alcance 3 tendrían que incorporarse en algunos casos, emisiones de insumos producidos en países extranjeros, lo que no está en nuestra política pública. Aun así, las empresas demandantes de estos insumos pueden usar este mecanismo para definir exigencias a la huella de carbono del producto, sin importar donde se generaron las emisiones.

Esto podría tener un impacto importante en la reducción de emisiones de nuestro país: si el sector minero gestiona las emisiones de la cadena de abastecimiento de las distintas faenas mineras (aguas arriba y aguas abajo) según estándares reconocidos a nivel internacional, se crearía un ecosistema de producción más sustentable, que ayudaría a impulsar el cambio en otros sectores que comparten proveedores con la industria minera.

Desafíos de trazabilidad

Para asegurar que toda la cadena de valor del proceso minero sea sustentable, es necesario contar con la trazabilidad completa del ciclo. Esto representa un gran desafío para la industria, pues requiere implementar un sistema de gestión que vea el proceso de manera global, integrado y no aislado por etapas, como se hace actualmente. Es fundamental que exista una legislación al respecto y una institucionalidad robusta capaz de medir, monitorear, fiscalizar y apoyar a las empresas.

Y en esto la tecnología juega un papel importante: El

big data, una estrategia estandarizada de monitoreo y sistemas integrados MRV (medición, reporte y verificación), son fundamentales para tener un control completo de lo que ocurre a lo largo de la cadena de valor y así identificar dónde se precisan más esfuerzos.

El desafío de trazabilidad en fundiciones y refinerías es particularmente complejo dado que estas procesan concentrados de distintos productores. En este punto, normalmente se mezclan concentrados de diferente calidad y origen, lo que dificulta el rastreo del producto. Una solución podría ser una fundición y refinería especialmente dedicada a minerales que requieren trazabilidad.

2.1.2 SOLUCIONES TECNOLOGICAS PARA UNA MINERÍA CARBONO NEUTRAL

Un importante desafío para avanzar en trazabilidad está en la gran cantidad de actores que integran la cadena de abastecimiento de la minería. No obstante, nuevas tecnologías como el blockchain¹¹ auguran avances.

Por otra parte, varias empresas del sector han adherido a estándares internacionales de verificación en producción responsable como son The Copper Mark o IRMA¹².

Junto con disminuir las emisiones, es necesario contar con sistemas de trazabilidad confiables. Reconociendo este desafío, el sector minero ha iniciado esfuerzos de reducción focalizándose, primero, en un uso más eficiente de la energía y en el reemplazo de fuentes de combustibles fósiles por energías limpias. Desde la matriz eléctrica, el sector minero ya comenzó a adquirir contratos de suministro en base a energías renovables y actualmente cerca de 2/3 del consumo del sector es abastecido por renovables. El hidrógeno verde (HV) y la electromovilidad podrían jugar un rol clave.

11. Blockchain: un conjunto de tecnologías que permiten llevar un registro seguro, descentralizado, sincronizado y distribuido de las operaciones digitales, sin necesidad de la intermediación de terceros.

12. <https://copper-mark.org/> y <https://responsiblemining.net/>

Chile se comprometió a alcanzar una descarbonización de la matriz energética al 2040¹³. Sin embargo, se ha señalado la factibilidad de conseguir esto al 2030, con un costo adicional de sólo US \$2.414 millones.

La minería chilena ha hecho esfuerzos importantes en temas de eficiencia energética, fomentados aún más con la ley 21.305 de Eficiencia Energética promulgada en 2021, pero falta que se haga responsable de sus emisiones de Alcance 2. Para conseguirlo se necesita tomar decisiones en el camino e incorporar las diversas tecnologías que ayudarán a alcanzar la carbono neutralidad de forma paulatina, lo que debe ir de la mano de un marco regulatorio e institucional para darle estabilidad a un esfuerzo de largo plazo, que incentive la certificación y la trazabilidad, fortaleciendo la competitividad y el desempeño socioambiental del sector. En ese sentido, la Política Nacional Minera 2050 ha contemplado que al 2050 el 100% de las empresas cuenten con un sistema de gestión y de auditorías en torno a la eficiencia energética.

Sin embargo, no es posible lograr la carbono-neutralidad sólo a partir de los cambios tecnológicos, por lo que también será necesaria la compensación de emisiones. Chile podría presentar un importante potencial de compensaciones asociado a Soluciones Basadas en la Naturaleza (SBN), las que además de beneficios económicos, proporcionan numerosos dividendos ambientales y sociales. Entre las alternativas más relevantes de analizar se incluyen el conocimiento científico de los ecosistemas; la conservación y protección de las cabeceras de las cuencas hidrográficas; la restauración de los flujos naturales; la protección estratégica de terrenos, reforestación y conversión forestal y restauración de riberas, humedales y turberas. Se requiere avanzar en la identificación de un portafolio de proyectos bancables y los marcos regulatorios habilitantes.

Desde la perspectiva energética, según datos de Cochilco, el consumo total de la minería del cobre

al 2018, fue de 176.747 TJ (TeraJoules), equivalentes a aproximadamente 49.000 GWh. Este consumo está dividido en aproximadamente un 47% combustibles y 53% electricidad. Gran parte de las emisiones de CO₂ corresponden precisamente al consumo energético. Para desarrollar una industria minera carbono neutral es clave impulsar un proceso de transición energética. A pesar de que existe un compromiso del gobierno de cerrar todas las centrales a carbón al 2040, la contribución del sector minero para acelerar este proceso podría ser muy valiosa, sobre todo después conocerse los resultados del último informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático¹⁴, (IPCC 2021).

El consumo de electricidad y combustible implica diferentes desafíos tecnológicos. En ambos, la minería es un comprador neto de energía. En lo relativo al consumo eléctrico, la condición de descarbonización puede ser trasladada al sector eléctrico por la vía de firma de contratos (PPA's) 100% renovables. Así, es el mercado eléctrico el que adoptará la transición, proceso que está en plena marcha, con la creciente participación de fuentes renovables, como las energías solar y eólica. Facilita este proceso el hecho de coexistir en la misma zona geográfica, precisamente, la industria minera con la disponibilidad de la mayor radiación solar del planeta. Energías Renovables (ER) parecen ser la principal solución para disminuir las emisiones de carbono de la minería y para ello es indispensable avanzar en la implementación de sistemas de almacenamiento, sean estos con sales, baterías o H₂ que viabilicen el complejo proceso de integración eficiente y sin impactos en la estabilidad de la matriz energética.

Aspectos como el suministro 24/7 comienzan a ser resueltos con la creciente incorporación de sistemas de almacenamiento en plantas solares y eólicas. Al momento de escribir este documento, la planta Cerro Dominador estaba en los primeros pasos de su entrada en servicio. Localizada en las cercanías de

13. Ministerio de Medio Ambiente. 2020. Contribución Determinada a Nivel Nacional de Chile, Actualización 2020. Recuperado de: https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2020/04/NDC_Chile_2020_espan%CC%83ol-1.pdf

14. IPCC. http://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIAR5_all_final.pdf

Calama, la planta opera mediante tecnología híbrida CSP+PV¹⁵. Es la primera planta CSP de Latinoamérica que incluye un sistema de almacenamiento térmico de hasta 14 horas, pudiendo suministrar energía base, operando desde el punto de vista eléctrico de manera equivalente a una planta de ciclo combinado o incluso una central de carbón. La interconexión con la zona sur permite implementar combinaciones de almacenamiento hidráulico, del tipo *pump-storage*¹⁶, lo que a su vez se combinará con otras opciones de almacenamiento para distintas aplicaciones, ya sea en base a baterías, *pump-storage* en tranques costeros artificiales o hidrógeno verde, entre otras.

La energía solar aparece como una de las alternativas más convenientes entre las ER, si consideramos que el 80% de la energía que consume la minería es demandada desde el Desierto de Atacama, que posee cielos despejados y altos niveles de radiación. La energía fotovoltaica tiene además muy bajo potencial de calentamiento global atmosférico (GWP), es silenciosa, usa poca agua, permite alimentar el proceso de desalinización y bombeo, ayuda a disminuir las emisiones e incluso podría contribuir a mejorar la relación entre la industria y las comunidades locales.

La energía fotovoltaica se puede aplicar a varios procesos de la minería, tal como lo demuestra el estudio "*Carpe Solem: Solar Mining Opportunities for Chile*" (Díaz-Ferran et al., 2019), que analiza cómo implementarla. Por ejemplo, se puede combinar la energía solar fotovoltaica y las baterías de almacenamiento, o también implementar soluciones solares para el manejo de agua y así ir disminuyendo el consumo de diésel y electricidad. Además, se pueden colocar paneles solares sobre los relaves para producir electricidad, al mismo tiempo que se evita la evaporación de agua. A pesar de que la eficiencia de sustituir la tecnología actual por energía solar no es igual en cada etapa de la cadena de producción minera, existe una evidente disminución del GWP en prácticamente todas las etapas del proceso.

La energía termosolar, por su parte, se presenta como una buena solución para cubrir una parte o la totalidad de la demanda térmica de la minería, en procesos industriales como calentamiento de pilas o en etapas como la electro-obtención y las necesidades domésticas de los campamentos mineros. Existen experiencias que podrían ser replicadas o consideradas dentro del mix energético futuro de las compañías, sumándose a otras tecnologías que pueden ser complementarias, como bombas de calor, biomasa e incluso H₂. El espacio que requiere este tipo de plantas podría ser una limitante para alcanzar el 100% de cobertura de la demanda, por lo que complementar tecnologías es una opción necesaria de analizar.

La eficiencia energética es también una herramienta poderosa y sofisticada que aporta a la reducción del consumo de energía y, por ende, a la reducción de emisiones. La minería ha venido implementando planes de eficiencia energética hace varios años, fundamentalmente motivada por la rebaja de costos. Hoy se suma a esta razón, la necesidad de apalancar las metas de disminución de emisiones.

La Ley de Eficiencia Energética (2021), apunta a mejorar la intensidad energética de la minería, obligándola en una primera etapa a reducir en un 4% su intensidad en el periodo de 4 años que dura el Plan Nacional de Eficiencia Energética. Dado el impacto que se requiere alcanzar en reducción de emisiones, es recomendable revisar cómo se vienen haciendo las cosas en el sector: la adaptación de procesos productivos históricamente estáticos debe cuestionarse, analizándose la producción y, sobre todo, la energía que se utiliza durante ciertos periodos del día y la posibilidad de reacondicionar procesos a horas que, por el tipo de energía generada, no solo es más barata, si no, menos contaminante. En el caso de un molino SAG (*semi autogenous grinding mill*), por ejemplo, si se logra gestionar la demanda energética al procesar los minerales más duros, es decir, los que necesitan más energía en periodos donde hay sol,

15. CSP+PV: Concentrated Solar Power + Photovoltaic/ Concentración Solar de Potencia + Paneles fotovoltaicos.

16. Pump Storage: sistema de almacenamiento de energía a través de un sistema de acumulación de agua que se libera en momentos de mayor demanda, captando rangos de mayores precios.

se alcanzarían mayores niveles de integración en el consumo de energía solar.

La gestión de la demanda energética también puede ser utilizada en el suministro de agua de una faena, la cual puede ser desalinizada y bombeada durante el día, utilizando estanques de almacenamiento para asegurar abastecimiento constante.

Para que la gestión de demanda sea incorporada en forma eficiente se tendrían que revisar ciertos paradigmas, dado que la operación minera está incentivada por la cantidad de toneladas procesadas/ producidas, sin considerar necesariamente el mayor costo energético que podría requerir este aumento de producción.

Existen etapas del proceso productivo donde será más difícil reemplazar el consumo energético por soluciones más limpias. Es el caso de las fundiciones, en que a pesar de que reducirían su GWP¹⁷ con la implementación de energía solar, se trata de una mejora cuyo impacto es bastante inferior, en comparación a otras etapas de la minería, debido a dificultades propias de este proceso.

En este caso, se proponen dos alternativas: primero, utilizar el enfriamiento controlado de escorias para su posterior tratamiento por molienda y flotación. Y segundo, llegar a la etapa de refinado a fuego con un cobre blíster que posea azufre como su impureza principal, evitando la presencia de arsénico (As), antimonio (Sb) o bismuto (Bi), con el objetivo de acortar la etapa de refinado a fuego, ser más eficientes en el uso de energía de hidrocarburos, junto con disminuir la emisión de gases de efecto invernadero.

Junto con impulsar el desarrollo de nuevas fundiciones es necesario promover el desarrollo de nuevos paradigmas de procesamiento de concentrados de cobre que podrían ser de cero misiones y baja huella de carbono.

2.1.3 OPORTUNIDADES PARA LIDERAR EL DESARROLLO DE SOLUCIONES TECNOLÓGICAS EN CARBONO NEUTRALIDAD

Dada la escala de nuestra minería, Chile posee el potencial para liderar el desarrollo de una oferta competitiva de bienes y servicios, para una minería y economía verde. Estos incluyen servicios de certificación y trazabilidad de la mano de las nuevas tecnologías digitales como el *blockchain*, soluciones de electromovilidad, producción de hidrógeno verde y Soluciones Basadas en la Naturaleza. Además, Chile puede posicionarse como un líder global y/o regional de estos bienes y servicios, atrayendo el interés de otros sectores e inversionistas, tanto a nivel nacional como internacional.

Considerando sus ventajas en la producción de minerales críticos, Chile podría ser pionero en temas de economía circular y trazabilidad en minería. El desafío consiste en producir competitivamente minerales verdes, posicionándose en los primeros cuartiles de la curva de costos de la industria, junto con desarrollar productos y servicios altamente competitivos, habilitantes de una producción responsable y sostenible.

Hay tres iniciativas, de distinta índole, que aparecen como oportunidades que la minería puede aprovechar para avanzar hacia la carbono neutralidad: la electromovilidad, el desarrollo de baterías de litio y el desarrollo de una industria del hidrógeno verde.

Para conseguirlo es fundamental que se adopten, adapten y desarrollen las tecnologías necesarias. El desafío es mayor, no existen recetas. Algunos elementos para tener presente se refieren a la necesidad de contar con un "ecosistema de innovación", impulsado con una estrategia de innovación para el desarrollo de una minería verde, que esté acompañado por un aumento significativo de la inversión en capital humano, transferencia tecnológica e Investigación y Desarrollo (I+D). Este esfuerzo debe estar organizado en torno a misiones de alto impacto

17. GWP: Global Warming Potential/Potencial de Calentamiento Global.

(Ej. Transición hacia sistema eléctrico de movimiento de materiales de alta eficiencia basado en energías de bajas emisiones), evitando la fragmentación de las iniciativas articuladas con un enfoque de portafolio, que permite administrar el riesgo tecnológico y mediar el impacto de los esfuerzos. Junto a lo anterior, es necesario fomentar el trabajo colaborativo entre industria, entidades públicas y academia, que estén alineadas y los esfuerzos vayan en una misma dirección.

Adicionalmente, las soluciones y tecnologías que la minería necesita también son utilizadas en otras industrias. Es altamente probable que muchos productos y servicios sean primero desarrollados para otra industria y luego transferidos a la minería, adaptándonos cuando sea necesario. Por eso es importante contar con una visión más amplia, que incluya múltiples industrias y en que el proceso sea implementado en alianza entre sectores para aprovechar la transferencia cruzada. Esto a su vez abre posibilidades de diversificación productiva.

Los desarrollos necesariamente deben realizarse en alianza con actores internacionales, tanto por acceso a capital como a conocimiento. El desafío es poder participar en cadenas globales de producción y redes globales de conocimiento.

Electromovilidad

Los desafíos tecnológicos más relevantes para la minería se encuentran en el sector de la movilidad, específicamente en la sustitución de diésel.

La electromovilidad es una de las tecnologías prometedoras y eficientes para reemplazar a los motores de combustión, pero, las tecnologías que permitirán este cambio no están disponibles a nivel masivo. Si bien se han dado pasos relevantes en transporte liviano, vehículos comerciales urbanos y vehículos particulares, aún no hay soluciones eficientes a escala industrial para maquinaria pesada, camiones fuera de ruta y sistemas de alta potencia, como requiere la minería.

En cuanto a maquinaria pesada, motores de alta potencia, vehículos de alto tonelaje y transporte de larga distancia, los vehículos eléctricos basados en celdas de combustible a hidrógeno ofrecen prestaciones más prometedoras y desempeños cercanos a los observados en vehículos diésel, pero tampoco están disponibles en el mercado con los necesarios respaldos operativos, logísticos y funcionales que la minería precisa. Solo hay pilotos en desarrollo, en etapas iniciales. Es importante considerar que, en forma complementaria, será necesario poner en marcha y adaptar la logística de suministro, abastecimiento y mantención de las flotas correspondientes. En el caso de vehículos a hidrógeno, por ejemplo, significa tener resuelta la cadena de valor completa: almacenamiento, transporte y abastecimiento del nuevo gas combustible. Esto además podría impulsar un sistema de acreditación de este tipo de equipos, tal como ocurre con las flotas de combustibles fósiles.

Por otra parte, incrementar el uso de la electromovilidad a todo nivel generaría un mercado asociado a dar un segundo ciclo de vida a las baterías que saldrán de estas aplicaciones. De otra forma, estaríamos solucionando un problema, pero creando otro potencialmente mayor por lo contaminante que son estos desechos.

Diversas marcas (OEMs¹⁸) han informado avances en el desarrollo de vehículos eléctricos, a batería o H₂. Por ejemplo, Volvo y Daimler anunciaron una alianza para desarrollar camiones en base a celdas de combustible; Cummins Diesel adquirió Hydrogenics, fabricante de electrolizadores y *fuel cells*, y hay diversos desarrollos en distintos grados de avance a nivel mundial.

Hasta el momento, la minería chilena ha explorado esta tecnología a nivel de buses eléctricos para el traslado de personal y algunos equipos para operaciones subterráneas, existiendo un importante potencial de reemplazo, desde equipos auxiliares hasta los camiones de extracción (CAEX). Estos últimos son el objetivo final y más ambicioso, dado que consumen sobre el 90% del diésel en las operaciones. Camiones de bajo tonelaje (200

18. Original Equipment Manufacturer, Fabricante de equipos originales.

toneladas) y cargadores frontales podrían ser equipos por explorar tempranamente, para ir generando las condiciones al interior de las operaciones, que permitan un cambio masivo y de alto impacto, a mediano y largo plazo.

La electromovilidad tiene una oferta limitada en la actualidad; Sandvik y MacLean tienen disponibles camiones LHD eléctricos, pero los costos limitan su masificación. La experiencia de Goldcorp, mina subterránea que opera en forma eléctrica en un 100% desde 2019, es interesante de analizar para entender los desafíos que ha enfrentado. Experiencias como esta pueden servir para movilizar a la industria chilena hacia esta nueva tecnología, que gradualmente irá siendo más competitiva y rentable.

Si bien las opciones tecnológicas para sistemas de transporte carbono neutrales aptos para la minería no estarán disponibles en el corto ni mediano plazo, es posible (y necesario) dar pasos desde ya para introducir estos sistemas en la industria, de manera no traumática.

El mayor reto es la transformación de equipos CAEX a eléctricos y/o H₂, donde la integración de sistemas basados en baterías y celdas de combustible es importante para permitir el frenado regenerativo de estos equipos. Así, es posible transformar parte de la energía cinética que se almacena en baterías. Esfuerzos aislados vienen desarrollándose en distintas partes del mundo, pero no han logrado una claridad absoluta sobre el estado de avance y los tiempos que podría demorar una migración de la tecnología diésel a equipos eléctricos y/o H₂. Urgen esfuerzos coordinados entre las compañías mineras y los proveedores de equipos, que permitan trazar una ruta clara de penetración de esta tecnología.

A nivel de pilotos, existen iniciativas lideradas por empresas que operan en Chile. Por ejemplo, la solución tecnológica de Anglo American de camiones mineros cero emisión que operan con un sistema de potencia propio con celdas de combustible a hidrógeno y baterías; el ingreso de Codelco y BHP como fundadoras a la *Komatsu Greenhouse*

Alliance; la participación de Antofagasta Minerals en el Consorcio Hydra, que ya desarrolló un piloto de motor con celdas de combustible para ser probada en vehículos en Minera Centinela y, la participación de varias empresas en la iniciativa *Charge On*, que busca acelerar el desarrollo de sistemas de carga de electricidad eficiente para camiones de extracción de alto tonelaje (CAEX).

Es importante generar conocimiento y capacidades técnicas, cercanía a las tecnologías y confianza en el manejo de nuevos combustibles. Y junto con ello, conocer y entender su potencial, preparar y anticipar los protocolos y aspectos logísticos y adaptar estos sistemas a las condiciones ambientales en que opera la minería, entre otros.

En relación con el hidrógeno, es importante destacar la existencia de opciones tecnológicas que facilitan un avance gradual en su uso e incorporación en minería y otros mercados de transporte, con aplicaciones que permiten adaptar las actuales flotas de vehículos. Mediante *retrofitting*, por ejemplo, pueden ser adaptados para usar combustibles sintéticos generados a partir de hidrógeno verde. Hay diversos procesos que, a partir de H₂V (Hidrógeno Verde) y del CO₂ capturado desde el aire o procesos térmicos, permiten sintetizar combustibles denominados *e-fuels*, los que pueden ser usados en motores convencionales de combustión, con modificaciones. Con el *e-fuel* se obtiene una reducción neta de emisiones, generada a partir del H₂V y el CO₂ capturado desde la atmósfera (DAC – *Direct Air Capture*). Las tecnologías para impulsar estas aplicaciones ya están disponibles, hay proyectos de diversa escala en desarrollo a nivel mundial. En la región de Magallanes, hay uno para generar gasolina sintética que se exporte a Alemania.

Los combustibles sintéticos o *e-fuel*, también pueden reemplazar o ser mezclados con combustibles fósiles usados en calderas y/o en motores diésel estacionarios utilizados en generadores (GLP, GN, Diésel). La cadena de valor de estos combustibles se puede observar en la Ilustración 3.

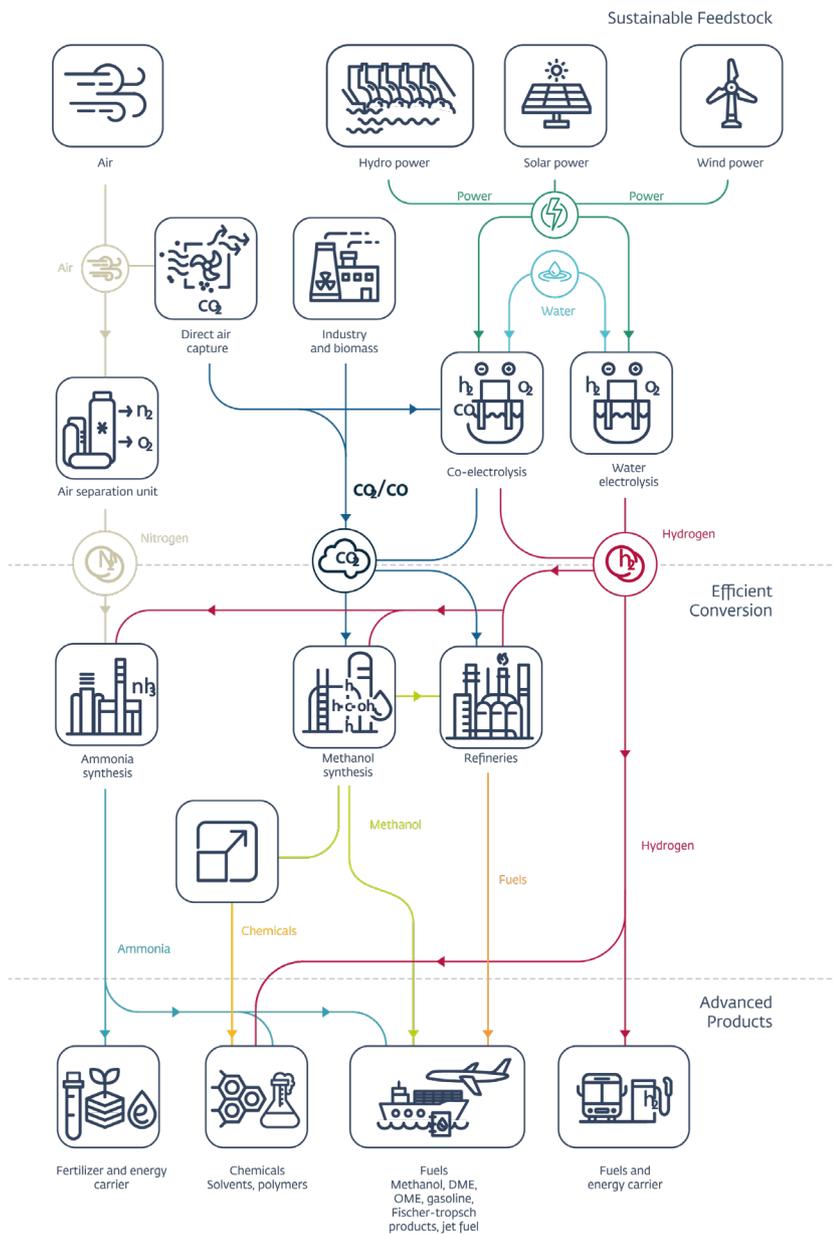


Ilustración 3: Cadena de valor combustibles sintéticos.
Fuente: Fraunhofer ISE, 2020.

La instalación de un *Hub* productor de H₂V, que produzca y abastezca de *e-fuels* a flotas de vehículos adaptados en la minería, constituye un proyecto de alto potencial para generar escalamiento industrial, permitiendo aprovechar la incomparable ventaja que implica contar en la misma zona geográfica, con la mayor radiación solar del planeta y uno de los mayores distritos mineros del mundo.

Materiales de litio

Chile podría participar más activamente en la cadena de valor de las baterías de ion litio, moviéndose desde la producción de carbonato de litio hacia la producción de hidróxido de litio y materiales catódicos del tipo LFP (litio, hierro y fosfato), NMC (Litio, Níquel, Manganeso y Cobalto) y NCA (Litio, Níquel, Cobalto y Aluminio), hasta el tipo LMO (Litio, Manganeso y Óxido), entre otros.

No se vislumbran ventajas competitivas y comparativas para entrar en el segmento de las celdas de combustible y baterías dado que ya existe un mercado maduro en otras geografías cercanas a la industria automotriz, siendo éste el principal elemento de competitividad. Los esfuerzos que hizo Corfo para avanzar en valor agregado con los contratos que hizo con Albemarle y Soquimich van en esa dirección. Estos esfuerzos deberían ser profundizados lo mismo que la atracción de inversión extranjera en alianza con actores locales.

Hidrógeno verde

Chile tiene condiciones excepcionales para producir hidrógeno verde a bajo costo, gracias a la diversa matriz de energías renovables, la disponibilidad de superficie, la cercanía a las costas y las fuentes de agua de los yacimientos minerales. Y el norte del país tiene ventajas específicas: dado que es un mercado bastante incipiente en comparación con otras tecnologías limpias, aún falta desarrollo industrial

e innovación para que se genere un mercado de hidrógeno global. Existe una oportunidad para que Chile se transforme en una potencia de hidrógeno verde y la implementación de celdas de combustible para maquinaria pesada de la minería.

Por otra parte, es fundamental diseñar políticas que impulsen la reconversión de la matriz productiva e integren el uso de este combustible, sobre todo sectores que utilizan gran maquinaria intensiva en uso energético, como navieras, acereras y cementeras, entre otras.

Al igual que en el caso de las baterías de litio, se podría explotar un mercado de reciclaje y ser un agente activo en un potencial mercado de hidrógeno verde, a nivel nacional y mundial. Sin embargo, existen importantes barreras de escala para el desarrollo de este tipo de tecnología. Impulsar la producción local requerirá de profesionales capacitados para producir la tecnología e implementarla, para adoptar un sistema de producción totalmente nuevo para nuestra economía, implementar un sistema de logística para la producción y su posterior transporte, entre otros. En esta línea, tampoco se deben descuidar las variables socioambientales, particularmente la necesidad de contar con licencia social para el uso del borde costero y los impactos del proceso productivo en los océanos. Para superar estos obstáculos se requieren recursos y una política de incentivos que genere las condiciones locales.

Reciclaje y sistemas circulares

Aumentar la eficiencia de los materiales y reducir los desechos de los procesos mineros son iniciativas que pueden potenciarse. Hay un número importante de insumos que podrían tener una segunda vida útil a nivel local. Para lograrlo, es importante impulsar y promover sistemas colaborativos con otras industrias, así como seguir fomentando políticas públicas que apunten a la re-manufactura y renovación de estos insumos.

2 . 2 M E T A S

- Contar con una metodología para el cálculo, reporte y gestión de emisiones de Alcance 1, 2 y 3, bajo estándares internacionales, homologada y operativa al año 2023.
- Crear una red de centros o institutos de investigación con foco en producción limpia, operativa al año 2025.
- Tener el 70% de la producción de cobre trazable al año 2025; y el 100% trazable al año 2030.
- Aumentar la participación de empresas locales en el desarrollo de soluciones tecnológicas para la trazabilidad y reducción de emisiones. Aumento de al menos 10% de las compras asociadas a estas soluciones provistas localmente al año 2030, respecto a línea base; 20% de aumento al 2040 y 30% de aumento al 2050, sobre línea base.
- Reducir la intensidad de emisiones en un 50% al año 2030 para la gran minería del cobre. Alcanzar la carbono neutralidad de la minería al año 2050.

2 . 3 I N V E R S I O N E S E I M P A C T O S

2 . 3 . 1 E S T I M A C I Ó N D E I N V E R S I O N E S

La energía solar fotovoltaica lleva la delantera en la inserción de energías renovables, sin embargo, para lograr una integración masiva y confiable a la red es necesario trabajar en su almacenamiento. Las opciones son variadas, pero el principal esfuerzo está puesto en baterías y tecnologías de Concentración Solar de Potencia (CSP). Para que estas alternativas se

complementen con la energía fotovoltaica y den mayor estabilidad, es necesario invertir en investigación para mejorar su eficiencia, reducir los costos de producción, aprovechar el uso de suelos y estudiar la gestión de los materiales necesarios para su construcción.

En materia de transporte es importante generar conocimiento y capacidades técnicas; cercanía a las tecnologías y confianza en el manejo de nuevos combustibles. Asimismo, conocer y entender su potencial; preparar y anticipar los protocolos y aspectos logísticos y adaptar estos sistemas a las condiciones ambientales en que opera la minería, entre otros. Para ello es imprescindible impulsar e invertir en el desarrollo de pilotaje industrial, en una primera fase en base a vehículos de tipo prototipo a escala menor, pero que implica contar con toda la cadena de valor instalada a escala en la faena minera, ya sea de tipo eléctrico a baterías o hidrógeno.

2.3.2 ENCADENAMIENTOS Y DESARROLLO PRODUCTIVO

La demanda que tendrá la minería por tecnologías limpias de generación de electricidad, electromovilidad y sistemas de eficiencia energética obligará a los proveedores a actualizarse o reinventarse para responder a las nuevas necesidades. Por otro lado, la integración de la economía circular al proceso de extracción minera podría generar un nuevo mercado de baterías de segunda vida o reutilización de desechos útiles para otras industrias, ayudándoles a reducir sus costos. Finalmente, la integración de las emisiones de Alcance 3 obligaría a proveedores y prestadores de servicios a impulsar esta transformación para cumplir con las nuevas exigencias.

Para entender el proceso que impulsará este cambio, primero debemos definir el ecosistema que se generará en torno a un nuevo mercado local de innovación, basado en tecnologías limpias. Dado que Chile posee ventajas en materiales de litio con

valor agregado e hidrógeno verde, es lógico que los esfuerzos de desarrollo de capacidades productivas y de I+D+i se orienten en este sentido. Además, ya se ha mostrado interés en impulsar estas industrias a nivel local, a través de la creación del Instituto de Tecnologías Limpias y otras políticas impulsadas por CORFO.

La integración de ER al proceso minero ayudará a reducir las emisiones de GEI, junto con extraer minerales estratégicos para el desarrollo de tecnologías limpias, baterías de litio y celdas de hidrógeno para la electromovilidad. Por otro lado, las ER son claves para la producción de hidrógeno verde, que puede servir como combustible para alimentar camiones de alto tonelaje.

En el caso de las baterías de litio existe una segunda vida: las baterías usadas en el sector eléctrico, que han bajado su eficiencia a alrededor del 70%, pueden ser muy útiles para el almacenamiento de energía en las faenas. Cuando no se puedan seguir utilizando, se pueden reciclar, al igual que las celdas de hidrógeno.

Es importante que Chile sea un actor relevante en la generación de estas tecnologías sostenibles para la minería, es una oportunidad para generar un sistema de innovación que perdure en el largo plazo. Así, cuando los yacimientos de cobre se agoten, Chile habrá desarrollado una industria tecnológica que provea a la minería del mundo, e incluso se adapte a otras industrias. Además, la minería chilena tiene condiciones únicas (faenas ubicadas a miles de metros sobre el nivel del mar, en el desierto más árido del mundo, por ejemplo), por lo que generar una tecnología propia podría ahorrar los costos de adaptar una extranjera y/o disminuir la frecuencia de su mantención.

En el caso del hidrógeno y el litio, se requerirán servicios de mantenimiento, sobre todo, en las faenas ubicadas en sectores cordilleranos y a muy bajas temperaturas,

donde es probable que la tecnología requiera mayor mantención que en condiciones normales. En el caso del segundo uso de las baterías, se requerirá adaptación y asesoría respecto a cómo integrarlas, pues es probable que no sean aptas para todas las industrias. Las empresas encargadas del reciclaje y segunda vida de baterías deben tener un sistema de monitoreo, asesoría y evaluación para integrarse con eficacia.

También se requerirá una comunicación efectiva del Estado para impulsar el uso de este tipo de productos. Si se quiere promover la economía circular en torno a la industria minera y que esto arrastre a otros sectores, es importante que se conozcan los beneficios de integrarse a la cadena productiva. También puede impulsarse con beneficios tributarios.

2.3.3 I + D + i

Para avanzar hacia una minería verde en Chile, se requiere aumentar la inversión en I+D+i, que hoy es muy baja -en comparación con el resto de los países de la OCDE- junto con incentivar el trabajo colaborativo entre industria, sector público, privado y academia.

En el país no existe un adecuado ecosistema de innovación; a pesar de que se desarrollan soluciones que llegan a escala prototipo, no hay suficientes empresas proveedoras que puedan tomarlos y generar productos comercializables. Esto tiene un efecto en la confianza que construye el sector industrial en las capacidades de innovación local, ya que a pesar de que los centros de investigación puedan encontrar soluciones exitosas, no se asegura que se desarrolle el producto, se actualice y le otorguen servicio de reparación y mantenimiento.

Un mayor presupuesto debe ir acompañado de la creación de una red de centros o institutos de investigación. La creación de esta red debe impulsarse junto al desarrollo de empresas de base tecnológica

que lleven a escala industrial las soluciones que el ecosistema de I+D+i desarrolle.

Además, la I+D no ha sido parte del marco institucional de la minería chilena, es decir, el desarrollo tecnológico no es una preocupación del Ministerio del ramo. Desde la política pública no se lo ve como un factor para mejorar la competitividad de la industria e impulsar el desarrollo productivo y económico del país.

2.3.4 CAPITAL HUMANO

Para generar un ecosistema de innovación basado en tecnologías limpias se requiere una visión más amplia a la hora de formar profesionales.

Dada la complejidad y desafíos que impone el calentamiento global, se necesitan técnicos y científicos capaces de trabajar en forma multidisciplinaria y en colaboración con profesionales provenientes de diversos rubros. Por un lado, se requerirán doctores y profesionales expertos en ingeniería, especialmente enfocados en temas de energía, materiales, mecánica, electricidad y minería. Además, se requerirá la presencia de profesionales provenientes de otras disciplinas, como sociología, ciencias políticas y antropología, fundamentales para entender cómo la sociedad se adapta y responde a los efectos del cambio climático. Su aporte es esencial para la generación de políticas públicas. Dado que las ER serán instaladas y operadas por empresas que conviven con comunidades, es importante que haya un proceso de educación y trabajo local para que este cambio sea aceptado de la mejor forma posible.

Si queremos transformarnos en una potencia en materiales de litio con valor agregado e hidrógeno verde se necesita hacer investigación.

Es clave formar técnicos capaces de emplear estas nuevas tecnologías dentro de la industria, como mecánicos, electricistas, mineros, entre otros. También

se requerirá capacitar a trabajadores para que se adapten a los cambios tecnológicos. Por ejemplo, los conductores de buses deberán pasar de un motor convencional a uno eléctrico, tendrán que darle un uso correcto y evitar accidentes.

2.4 PROPUESTAS DE PROYECTOS ESTRATÉGICOS, INNOVACIÓN Y BARRERAS A SUPERAR

A continuación, se desarrollan propuestas que apuntan a superar las barreras que enfrenta la minería para alcanzar más rápido la carbono neutralidad.

2.4.1 GENERACIÓN DE UNA PLATAFORMA PARA LA TRAZABILIDAD

Para avanzar en trazabilidad e insumos, emisiones y residuos de la minería nacional polimetálica, es necesario habilitar el monitoreo de insumos, emisiones y residuos de la industria, a partir del desarrollo de una Plataforma para la Trazabilidad ágil, eficiente, automatizada (o semiautomatizada) segura e integrada, que valide y certifique el suministro responsable de información ante la sociedad, los mercados internacionales y la toma de decisiones interna.

Un esquema y sistema de estas características permitirá e incentivará la recolección y disposición de información de interés público y privado, junto con la adopción de los estándares de integridad al interior de la industria y la cadena de valor en la minería. Habilitará, finalmente, la posibilidad de desarrollar un Observatorio de Sostenibilidad abierto, bajo la responsabilidad de la gobernanza idónea vigente o por desarrollar, por ejemplo, a través de la participación de Cochilco y su plataforma Minería Abierta, en colaboración y coordinación con otros actores y sistemas relevantes.

2.4.2 PROPUESTAS ASOCIADAS A LA DESCARBONIZACIÓN, TRAZABILIDAD, MERCADO ELÉCTRICO Y ALMACENAMIENTO

El suministro de electricidad proviene del Sistema Eléctrico Nacional (SEN) y Plantas Generadoras interconectadas, donde la sinergia y aprovechamiento de economías de escala está implícito en el suministro de energía coordinado por el CEN (Coordinador Eléctrico Nacional). Por eso, aun cuando las empresas mineras contraten el 100% de su energía con fuentes renovables, el sistema del cual retiran la energía mantendrá una componente relevante de energía con huella de carbono hasta que el 100% del sistema sustituya todas las fuentes contaminantes.

Se propone seguir incentivando el reemplazo y/o renegociación de contratos de suministro de energía con los generadores, para que reemplacen el equivalente a la energía contratada por generación 100% renovable, ubicada en cualquier punto del SEN (Sistema Eléctrico Nacional); establecer políticas de abastecimiento bajas en emisiones para sus proveedores, hoy solo se incluyen para el suministro de electricidad; incorporar sistemas de almacenamiento distribuidos a lo largo del SEN que hagan técnicamente posible la conexión de más proyectos ER. Estos proyectos pueden ser baterías ubicadas centralizadamente en subestaciones principales del SEN o bien distribuidas en barras de ingreso a los sistemas de distribución o de clientes libres. Alternativamente, pueden ser grandes centrales de bombeo, ámbito en el que hay proyectos en etapa de desarrollo; producción de Hidrógeno Verde y celdas de combustibles individuales ubicadas en barras de proyectos ER o colectivos, ubicados en puntos de saturación de inyecciones del SEN; profundizar el desarrollo de plataformas como Renova que permite un registro único y balance *online* de la generación, consumo y transacciones relacionadas con energías renovables y no renovables.

La incorporación de nuevos proyectos de energías renovables en el SEN plantea desafíos de la intermitencia de estas fuentes de energía. La inversión en transmisión permite, en parte, enfrentar el desafío de generar un sistema eléctrico estable que satisfaga la demanda en todo momento. Sin embargo, el desarrollo de líneas de transmisión troncal tiene largos periodos de planificación y ejecución, y costos económicos y ambientales significativos. Por ello, se deben incorporar alternativas de almacenamiento a la planificación de la transmisión, para permitir una mayor penetración de energías renovables manteniendo la estabilidad y satisfacción de la demanda. La optimización del sistema implica cierta sustitución entre inversión en transmisión troncal y almacenamiento.

Para llevar a cabo estas propuestas los siguientes actores deberían estar involucrados: generadores, transmisores, empresas mineras y grandes clientes, empresas distribuidoras, Coordinador Eléctrico Nacional. Por parte del Estado: Ministerios de Minería y Energía, Medioambiente y Comisión Nacional de Energía.

Y se propone evaluar la aplicación de instrumentos como:

- Incentivos para incorporar potencia de punta con fuentes no contaminantes.
- Mantener y fortalecer las señales de incentivo para el desarrollo de generación distribuida.
- Evaluar la figura de auto productor de energía no limitada a un mismo rol de propiedad, sino con la posibilidad de ubicar proyectos de autoproducción de energía eléctrica ERNC en cualquier punto del SEN (Ley).
- Aumentar el impuesto a las emisiones de CO₂ de los US\$5/ton CO₂ actuales para generar incentivos a la inversión y a las energías

limpias, en coherencia con los objetivos del país de descarbonización (Ley). Ello impulsa transversalmente las propuestas planteadas.

2.4.3 PROPUESTAS ASOCIADAS AL DESARROLLO DE NUEVAS TECNOLOGÍAS Y A LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO VERDE

El Desierto de Atacama tiene la mejor radiación del mundo, lo que permitiría la producción de hidrógeno verde y sus derivados, como combustibles limpios y amoníaco a costos competitivos a escala global.

Estas opciones pueden realizar una contribución significativa en la sustitución de combustibles fósiles en la minería. Alrededor de 8 millones de toneladas año de emisiones de CO₂ están asociadas al uso de combustibles fósiles en actividades de Alcance 1; 1 millón de toneladas año en minería y alrededor de 3 millones de toneladas año, por insumos (excluyendo electricidad) y transporte terrestre.

El hidrógeno verde implica considerar diversos casos de uso con diferentes grados de madurez tecnológica y viabilidad económica. El avance en este ámbito requiere impulsar pilotajes de los diferentes casos de uso. Existe además la opción de exportar hidrógeno verde y productos derivados, ya sea combustibles o químicos, donde podrían existir sinergias y economías de alcance entre el uso doméstico en minería y exportación.

Un caso maduro, desde el punto de vista tecnológico, es la producción de amoníaco para el mercado interno para producir explosivos en la minería. Sin embargo, el consumo de amoníaco en la minería solo llega al 50% de la escala de producción eficiente de una planta *Haber Bosch*. Por otra parte, las fluctuaciones del precio internacional del amoníaco gris introducen riesgos excesivos a quienes inviertan en un proyecto que

aprovecha economías de escala. La solución óptima requiere integrar las actividades de exportación, utilizando la actual infraestructura portuaria para importar amoníaco y carbón (que está en retirada) para generar una industria de exportación, que aprovecha los costos hundidos de inversión en infraestructura. Junto con ello habría que concordar con la industria minera contratos que reduzcan el riesgo de las acentuadas fluctuaciones del precio del amoníaco gris, que depende del precio del gas natural en el Golfo de México y el Caribe. Dado el tamaño de los actores involucrados el Estado debe cumplir principalmente un rol catalizador para facilitar acuerdos.

La provisión de hidrógeno verde en faenas mineras todavía está en fase de pilotaje. La estructuración de soluciones consorciadas para el pilotaje creando *hubs* de innovación es una alternativa que debe considerarse.

Recientemente, en el marco de la Cumbre Global CEM12/MI6 (*Clean Energy Ministerial 12 y Mission Innovation 6*), donde Chile actuó como anfitrión por su rol en la COP25, fue lanzada la nueva misión de hidrógeno limpio, con la visión de promover los denominados “valles de hidrógeno”. El Ministerio de Energía de Chile, junto a la Unión Europea, Australia y Reino Unido liderarán la iniciativa.

La infraestructura de electrólisis y almacenamiento ocupa un espacio mínimo comparado con la superficie requerida para la generación eléctrica fotovoltaica o eólica. Las hidrolineras para carga de hidrógeno deben estar localizadas lo más cerca posible de las faenas, para reducir costos de operación. Dada la escala de cada operación, soluciones distribuidas de carga de hidrógeno son factibles.

La producción y almacenamiento de hidrógeno presenta economías de escala y se deben buscar soluciones sinérgicas.

Se propone que:

- El Estado defina como área prioritaria el desarrollo y adaptación de tecnologías limpias para la minería y otras industrias en Chile.
- El Estado promueva la colaboración entre empresas mineras y energéticas, de entidades de investigación y desarrollo tecnológico nacionales e internacionales relevantes, para establecer en el norte de Chile espacios de pilotaje de soluciones de hidrógeno para la minería.
- Articular activamente iniciativas de pilotaje con la pequeña y mediana minería, para darle acceso temprano a las nuevas tecnologías, a la vez que se avanza en el proceso de escalamiento y maduración para ser aplicadas en operaciones de mayor envergadura.
- En la fase de escalamiento, el Estado puede incidir en la generación de soluciones integradas, que aprovechen economías de escala y que reduzcan los impactos ambientales. Los ministerios de Bienes Nacionales, Medio Ambiente, Energía y Minería pueden, actuando conjuntamente, incentivar soluciones sinérgicas.
- Promover la coordinación, financiando estas iniciativas a través de CORFO, ya sea intermediando créditos verdes u otorgando garantías en conjunto con entidades internacionales, así como con la participación de la “empresa pública Desarrollo País o la futura Banca Nacional de Desarrollo” (Fondo de Infraestructura).

Respecto de los actores involucrados, existen dos ámbitos de coordinación: el desarrollo de casos de uso para la minería y la articulación de soluciones de escalamiento que aprovechen economías más

eficientes. En este último ámbito debieran coordinarse las empresas mineras, empresas de energía, desarrolladores e inversionistas, y el Estado a través de los Ministerios de Bienes Nacionales, Medioambiente, Minería y Energía, CORFO y la “empresa pública Desarrollo País o la futura Banca Nacional de Desarrollo”.

Mientras que, para generar iniciativas colaborativas de desarrollo de casos de uso para minería, es necesario incorporar a universidades, centros tecnológicos y empresas de base tecnológica, proveedores tecnológicos y proveedores de equipos para la minería. Se propone usar instrumentos como:

- Estructurar el Instituto de Tecnologías Limpias (licitado por CORFO), como una plataforma de pilotaje y desarrollo tecnológico para impulsar la minería verde, con un componente principal en hidrógeno verde para sustituir el petróleo. El financiamiento debería provenir de los recursos de las regalías a la I+D de los contratos del litio que gestiona CORFO, establecidos con el propósito de impulsar la minería verde y el ecosistema de innovación.
- En el caso de escalamiento temprano de soluciones que requieren infraestructura tecnológica compartida, el Estado puede mitigar y compartir riesgos y facilitar el acceso a financiamiento verde. CORFO es la agencia que puede vincular los proyectos con iniciativas globales de financiamiento, en caso de requerir garantía de la República, mecanismo que se utilizó con el banco alemán KfW para el financiamiento de la planta solar Cerro Denominador. Adicionalmente, se pueden generar contratos contingentes (garantías) que permitan mitigar ciertos riesgos que enfrentan los proyectos, con un costo para los desarrolladores. CORFO también puede impulsar fondos de capital de riesgo que tomen una participación de capital en los proyectos.

- La empresa pública Desarrollo País o la futura Banca Nacional de Desarrollo puede tomar participaciones minoritarias en proyectos de infraestructura de hidrógeno, como capital paciente, con opciones de salida a largo plazo, cuando se materialice el potencial de las iniciativas.

- Aumentar el impuesto a las emisiones de CO₂ de los US\$5/ton CO₂ actuales de forma de internalizar las externalidades de los combustibles fósiles y generar incentivos para la inversión en combustibles limpios.

2.4.4 CONSIDERACIONES SOCIOCULTURALES Y DE ACEPTACIÓN SOCIAL

Reputación y aceptación: la oportunidad en el cambio

La industria minera es percibida como una industria extractivista, de poca sofisticación, que genera grandes impactos en el territorio y el medio ambiente. Un desafío importante es que los esfuerzos por avanzar hacia una minería de bajas emisiones no sean interpretados como un intento de lavado de imagen (*green washing*) sino, como un esfuerzo sincero por la transformación de la industria.

La minería está en posición de contribuir al desarrollo nacional, no solo mediante su aporte al capital económico, sino también a través del incentivo al desarrollo tecnológico y humano avanzado. Estos elementos, tienen un efecto en el capital cultural del país.

Uso de suelo

La provisión de energías renovables, a la escala requerida por la minería, precisa de grandes superficies para instalar su infraestructura. Esto

puede representar una barrera ya que debe competir con otras actividades económicas y comunidades que pueden verse afectadas. Estas consideraciones aplican también en áreas de baja densidad poblacional y escaso uso alternativo en otras actividades, como son las zonas desérticas en el norte del país.

Desplazamiento y transformación del empleo

Hasta aquí hemos abordado el tema del empleo desde la perspectiva de la generación de nuevas y desafiantes plazas. No obstante, corresponde observar también cómo la transformación propuesta puede impactar negativamente. Por ejemplo, debido al inevitable cierre de las generadoras de energía con combustibles fósiles, habrá una reducción de empleo importante.

El cambio tecnológico para transitar hacia una industria de bajas emisiones tiene potencial de creatividad destructiva, ya que por cada empleo que se crea puede haber destrucciones de empleos por la tecnología que está siendo desplazada. Se deben considerar planes de reconversión o reubicación de una eventual fuerza laboral desplazada.

Liderazgo y perseverancia

El éxito de las propuestas presentadas está fuertemente determinado por la fuerza con que se instalen en la agenda del sector. Ello requiere de liderazgos con la convicción de perseguir, revisar, mejorar y cumplir las metas trazadas.

2.4.5 OTRAS CONSIDERACIONES

Incertidumbre sobre desarrollos tecnológicos

Si bien la industria minera chilena es grande, no dispone de mecanismos que permitan asegurar una fecha en que se cuente con camiones CAEX de bajas emisiones. Esto agrega un grado de incertidumbre a las metas

trazadas, en torno a la reducción de emisiones de alcance del sector, dado que parte importante de ellas están asociadas al consumo de los camiones CAEX.

Barreras de escala

La envergadura de la gran minería del cobre conduce muchas veces a que se preste mucho menos atención a la pequeña y mediana minería. La heterogeneidad de quienes conforman ese grupo, la menor disponibilidad de ingresos y el menor acceso a tecnologías hacen complejo cumplir con los ritmos impuestos por las metas de la gran minería. La pequeña y mediana minería requiere apoyos financieros específicos para avanzar hacia una producción de bajas emisiones.

2.5 COORDINACIÓN CAPÍTULO 2

Willy Kracht, Osvaldo Urzúa, Marco Vaccarezza, Ricardo Lizana, María Luisa Lozano, Víctor Pérez, Marcela Angulo, Annie Duffey, Edgar Estupiñan, Jorge Cantallopts, Carla Lorenzo, Ignacio Pérez, Jorge Valverde, Cristián Mosella, Constanza Araya, Bernardita Fernández, Javier Ruiz del Solar, Carmen Luz Contreras, Rodolfo Camacho, Bárbara Salinas, Marcela Paiva, Vanessa Maynou, Sebastián Avilés, Marcelo Valdebenito.

RECURSO HÍDRICO Y ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO

Desde comienzos de 1990, grandes inversiones mineras públicas y privadas basaron su estrategia hídrica en el uso de agua continental como principal fuente, lo que, sumado a los efectos del cambio climático, ha generado impactos que en algunos casos son irreversibles sobre las cuencas endorreicas y ecosistemas de montaña de la zona árida y mediterránea del país. Uno de ellos es la escasez de agua y otro, la degradación de los suelos producto de lluvias intensas en zonas tradicionalmente secas. Lo que, además, ha generado una opinión pública contraria y suspicaz hacia la actividad minera.

La minería consume hoy un 3% del agua continental, recircula el 76% del agua en sus procesos¹⁹ y al 2031, aproximadamente, el 50% de ese consumo provendrá de agua desalada²⁰. La instalación y operación de estas plantas exige acelerar procesos de planificación e investigación para evitar o revertir posibles impactos negativos sobre la biodiversidad de la zona costera marina. Por las razones anteriormente expuestas, es necesario impulsar un trabajo colaborativo con las autoridades, la comunidad científica y las comunidades locales para generar información sobre las cuencas y planes de acción frente a potenciales riesgos climáticos.

19.
COCHILCO. 2020.
Consumo de agua
en la minería del
cobre al 2019.

20.
COCHILCO. 2020.
Proyección de
consumo de agua
en la minería del
cobre 2020-2031.

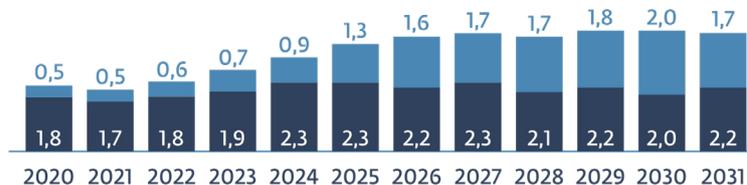
3.1 ÁMBITOS DE ACCIÓN

Hoy, la minería consume un 3% del agua continental que se usa en el país. Sin embargo, al concentrarse la mayoría de sus actividades en zonas áridas, este consumo debe ser analizado a nivel regional donde se observa que el mayor consumo se produce en la región de Antofagasta (donde se produce el 54% del cobre en Chile), lo siguen las regiones de O'Higgins y luego Atacama, Valparaíso y Tarapacá²¹ como se puede ver en la Ilustración 4.

I Región: Tarapacá



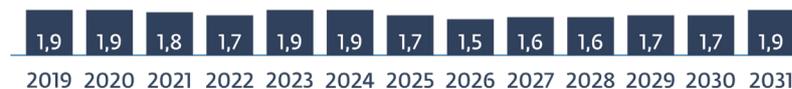
III Región: Atacama



V Región: Valparaíso



VI Región: O'Higgins



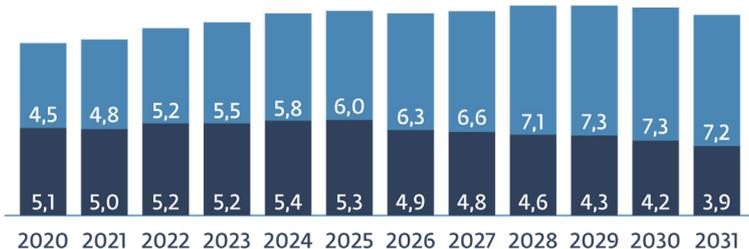
■ Agua Continental ■ Agua de Mar

21.
COCHILCO. 2020.
Consumo de agua
en la minería del
cobre al 2019.

XV Región: Arica y Parinacota



II Región: Antofagasta



IV Región: Coquimbo



Región Metropolitana



■ Agua Continental ■ Agua de Mar

Adicionalmente, la industria minera recircula el 76% del agua en sus procesos y como ya se ha señalado, grandes operaciones mineras están migrando hacia el uso de agua desalada. Actualmente existen más de 12 plantas en estado de operación y construcción y hay aproximadamente 15 plantas proyectadas.

Por otra parte, la operación y abandono de los campos de pozos de agua continental utilizados durante años, así como el impacto del cambio climático sobre los glaciares que además y en algunos casos, recibieron impacto por parte de la actividad minera en zonas de alta cordillera, ha producido efectos a distintas escalas sobre los ecosistemas y su biodiversidad asociada, lo que impone la necesidad de investigar su posible recuperación en aquellas zonas donde aún existen dichos ecosistemas, de manera de asegurar sus servicios ecosistémicos como la provisión de agua para consumo humano y el sustento de la biodiversidad. El cambio climático genera desafíos en términos de adaptación para las operaciones mineras incluyendo todo el proceso operativo, desde los yacimientos, siguiendo por el transporte de carga y puertos de embarques, así como la creciente construcción y operación de plantas desaladoras.

En este contexto, el trabajo se enfoca en los siguientes ámbitos:

- Disponibilidad de agua: desalación, agua continental, aguas grises y recarga artificial.
- Adaptación al cambio climático en operaciones mineras: yacimientos, transporte, embarques, plantas desaladoras, relaves y botaderos de estériles en el sector costero y continental. Soluciones colaborativas con comunidades.
- Eficiencia en el uso del agua en el contexto de cambio climático.

3.1.1 DISPONIBILIDAD DE AGUA: DESALACIÓN, AGUA CONTINENTAL, AGUAS GRISES Y RECARGA ARTIFICIAL

Las grandes empresas mineras han ido reemplazando individual y paulatinamente sus fuentes de agua continental por plantas desaladoras de agua de mar. Actualmente, el sector tiene 8 plantas desaladoras y 3 sistemas de impulsión de agua de mar sin desalar operando y según informes de Cochilco, existen 11 proyectos en ejecución además de otras 15 iniciativas hacia el año 2031. Con ello, aproximadamente un 50% de los recursos hídricos que utiliza la minería provendrán de agua de mar como se observa en la Tabla 1.

El uso de agua desalada impone desafíos en términos regulatorios y de conocimiento, de manera de asegurar que las operaciones de estas plantas no afecten el medio ambiente marino y minimicen potenciales conflictos con las comunidades costeras.

Tabla 1: Proyección consumo de agua esperada periodo 2020-2031 en la minería del cobre.

(m³/seg)	2020	2021	2022	2023	2024	2025
AGUA CONTINENTAL	12.8	12.4	12.8	13.2	13.8	13.6
AGUA DE MAR	5.7	6.0	6.5	7.5	8.2	9.2
TOTAL GENERAL	18.5	18.4	19.3	20.7	22.0	22.8
(m³/seg)	2026	2027	2028	2029	2030	2031
AGUA CONTINENTAL	13.0	12.8	12.4	12.3	11.9	12.4
AGUA DE MAR	9.8	10.3	10.9	11.2	11.3	10.9
TOTAL GENERAL	22.8	23.0	23.3	23.5	23.2	23.3

Fuente: COCHILCO, 2020.

3.1.2 ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO EN OPERACIONES MINERAS

En los últimos años, el clima extremo como consecuencia del cambio climático ha afectado las operaciones mineras. Uno de los efectos es la ocurrencia de lluvias intensas, que podrían aumentar la erosión de suelos, afectando la estabilidad de pendientes o inundaciones en los rajos. En el caso de tranques o piscinas de relaves, puede existir un riesgo de desborde con sus consecuentes efectos; similar es el caso de infraestructura de captación y tratamiento de aguas, donde pueden existir problemas de infraestructura y operación. Estos escenarios pueden generar situaciones de riesgo y daño significativo de la reputación, poniendo en riesgo la licencia social para operar.

Otro tema que debe ser considerado es la escasez de agua para las actividades de extracción, procesamiento y refinación.

En el caso del alza de temperaturas es necesario considerar la ocurrencia de incendios forestales en aquellas regiones donde existen operaciones cercanas a zonas forestales. Este aumento de temperatura también puede incrementar la demanda y costos de energía para usar en enfriamiento de equipos. Y adicionalmente, el aumento de la demanda de energía y agotamiento de la capacidad de las instalaciones de transmisión y distribución puede resultar en interrumpir el suministro a las operaciones. Escenarios de racionamiento de energía pueden conducir a disminuciones permanentes de la producción. Otro efecto posible de observar es el incremento de cargas de polvo, aumentando los costos en medidas de abatimiento.

Por otra parte, el aumento del nivel del mar y eventos desastrosos como marejadas, aumento en la frecuencia de los vientos debe ser considerado como otro riesgo

que podría dificultar las operaciones de embarques de puertos destinados a la carga de minerales.

Los sitios mineros heredados y rehabilitados, bajo regímenes climáticos anteriores, pueden requerir medidas de protección suplementarias para garantizar la estabilidad de las cubiertas de roca estéril y relaves. Los costos de responsabilidad ambiental pueden aumentar y las responsabilidades de monitoreo pueden extenderse para asegurar la efectividad de las medidas de recuperación.

Lo más probable es que la variabilidad y el cambio climático exacerben estos impactos.

3.1.3 EFICIENCIA EN EL USO DE AGUA EN EL CONTEXTO DE CAMBIO CLIMÁTICO

La principal problemática de la minería es el uso y cantidad de agua disponible, debido a que Chile presenta estrés hídrico en varias regiones del país. Actualmente, el consumo de agua para las operaciones mineras de origen continental alcanzó los 12,45 m³/s (2019). Por su parte el consumo de agua de mar fue de 4,06 m³/s y el agua recirculada fue de 53,32 m³/s según datos de Cochilco.

3.2 METAS

3.2.1 ECOSISTEMAS RELACIONADOS CON EL AGUA

Aportar esfuerzos técnicos y financieros para restaurar aquellos ecosistemas afectados por operaciones pasadas, considerando los efectos del cambio climático. Junto con ello, impulsar la innovación para minimizar el impacto sobre los ecosistemas marinos ante la creciente tendencia del uso de agua desalada.

Al 2030, realizar un catastro y evaluaciones de

los ecosistemas impactados por el uso del agua para el desarrollo minero y el cambio climático, así como estudios en torno a la funcionalidad de los ecosistemas. Al 2040, mitigar los impactos sobre aquellos ecosistemas impactados por el desarrollo de la industria minera y al 2050, recuperarlos. Asimismo, implementar al 2030, sistemas de trazabilidad y verificación del 100% de la disponibilidad de agua, para cubrir la demanda hídrica del proceso minero, promoviendo la generación de indicadores de seguridad hídrica y evaluando la seguridad en las cuencas donde se encuentran las operaciones. Los indicadores deberán ser revisados permanentemente, generando planes de acción que apunten a disminuir las brechas detectadas.

3.2.2 GESTIÓN INTEGRADA DE RECURSOS HÍDRICOS (GIRH)

Promover la constitución de Comunidades de Usuarios de Cuencas, que se identifiquen como elementos clave para la gestión integrada de recursos hídricos con instancias de participación, capacidades técnicas disponibles para todos los actores, y recursos para la medición, gestión y transferencia de información.

Al 2030, constituir a la industria minera en un actor relevante en la conformación de Comunidades de Usuarios de Cuencas e implementar un plan de gestión integrada de recursos hídricos, alineado con el concepto de seguridad hídrica en todas sus dimensiones. Al 2040, se espera que las comunidades de usuarios de cuenca estén suficientemente fortalecidas. Se debe revisar y actualizar un sistema de gobernanza y desarrollar un plan de gestión sostenible de recursos hídricos. Es necesario incluir en los Planes de Ordenamiento Territorial (POT) y Planes Regionales de Ordenamiento Territorial (PROT) las áreas consideradas para el desarrollo de plantas desaladoras y operaciones mineras.

Al 2025, disponer de una plataforma completa,

accesible, cibersegura y actualizada digitalmente en forma permanente, con responsables identificables de la data alimentada y reportes de gestión transversales para todo tipo de usuarios en el país. Esta deberá actualizarse anualmente. Al 2050 se espera que sea de última generación, alineada con las innovaciones en el mundo de los sistemas de información digital.

3.2.3 CALIDAD, CANTIDAD DE AGUA E INFRAESTRUCTURA COMPARTIDA

Promover la constitución de Comunidades de Usuarios de Cuencas, que se identifiquen como elementos clave para la gestión integrada de recursos hídricos con instancias de participación, capacidades técnicas disponibles para todos los actores, y recursos para la medición, gestión y transferencia de información.

Adicionalmente, modificar procesos para eliminar el riesgo de contaminación de fuentes de agua y crear condiciones, instrumentos y normativa para la gestión sustentable e infraestructura común, que considere el aumento progresivo en la desalación de agua de mar y de aguas servidas o residuales que descargan al mar. Al 2030, generar una línea base de fuentes de consumo y trazabilidad validada e implementar la generación anual de reportes. Para asegurar la disponibilidad del recurso, revisar la factibilidad de hacer intercambios (*swap*) de agua desalada por aguas de contacto²².

Al 2030 tener una versión actualizada de la guía 2021 para evaluación de plantas desaladoras.

Al 2030, contar con un reglamento-guía para la evaluación ambiental de plantas desaladoras de agua de mar y aguas servidas o residuales descargadas al mar, considerando los impactos acumulativos. Una vez promulgado, considerar cada cierto tiempo (10 años a lo menos) la revisión y optimización de la infraestructura compartida.

Al 2040, contar con una proyección del potencial de la desalación de agua de mar, en línea con las necesidades de consumo proyectadas para las operaciones mineras y otros usos.

Se espera que el mayor porcentaje de la demanda hídrica en la gran minería será sobre la base de agua desalada, servidas o residuales, reemplazando el porcentaje de las extracciones de agua continental que afecten significativamente los ecosistemas o consumo humano, en coordinación con actores relevantes y de acuerdo con las regulaciones vigentes.

3.2.4 ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO

Impulsar la adaptación al cambio climático, en una perspectiva de trabajo colaborativo con las comunidades aledañas, permitiendo establecer planes de acción y reforzar canales de transporte, comunicación y suministro orientados a dar continuidad operacional ante potenciales riesgos climáticos.

En las cuencas donde se desarrolla la industria minera, es de gran importancia capturar información climática y meteorológica confiable y trazable. Al 2030 es vital la creación de una red robusta de captura de información climática y meteorológica, fomentando el desarrollo y actualización de modelos predictivos precisos para anticiparse a eventos catastróficos, con planes de acción colaborativos para prevenir el impacto de dichos eventos en las comunidades, ecosistemas y mantener la continuidad operacional. Al 2040 fortalecer esta red de captura y modelación con los países que limitan con Chile (Perú, Bolivia y Argentina), donde también hay minería. Los modelos deberán ser revisados y actualizados acorde a la obtención de datos y habilitación de nuevas estaciones de monitoreo.

Los planes de acción colaborativos incluyen el desarrollo de mesas de trabajo en forma sistemática,

22. Aguas de contacto: en general, aguas escorrentías y flujos superficiales o subterráneos de origen natural, que entran en contacto con materiales derivados de la minería, como ripios y material estéril, a partir de lo cual pueden afectar su calidad.

lo que permitirá definir planes de abastecimiento y de emergencia ante eventuales eventos catastróficos.

3.2.5 EFICIENCIA EN EL USO DEL AGUA EN EL CONTEXTO DE CAMBIO CLIMÁTICO

Proporcionar información trazable, verificable y pública sobre el uso del recurso hídrico, el estado actual y proyección en los territorios de concesión minera, y la influencia que tiene la minería, otras industrias y asentamientos humanos, aplicando estándares internacionales.

Al 2025, establecer una línea base, metas y planes de eficiencia hídrica en toda la gran minería y al 2030, implementar y actualizar en forma permanente un sistema de gestión de eficiencia hídrica, alineado con el Plan de Adaptación al Cambio Climático del sector minero y la estrategia del país. Al 2040, convertir este sistema en una plataforma de consulta, pilar fundamental en la toma de decisiones del desarrollo del proceso minero.

Al 2025, implementar o adoptar una metodología para medir la eficiencia de reúso y reciclaje de agua en todas las operaciones y definir una línea base. Al 2030, mostrar una mejora continua en la eficiencia, disminuyendo extracciones y aumentando el reúso y reciclaje. A la misma fecha, aplicar las mejores prácticas mediante metodologías de contabilidad hídrica, para analizar y optar por un abastecimiento de mínimo impacto ambiental. Implementar tecnologías para reducir la huella hídrica de relaves activos (porcentaje de humedad y alternativas de depositación).

Al 2040, haber mejorado la contribución del sector minero a la seguridad hídrica en las cuencas mineras a través del aumento de la eficiencia de reúso y reciclaje, a una mayor al 85%. Y reducir, significativamente, el coeficiente unitario de aguas continentales al 2050, no superando el 5% del agua total utilizada por el sector.

3.3 SOLUCIONES, TECNOLOGÍAS PRIORITARIAS Y ESTRATÉGICAS

A continuación, se identifican los esfuerzos de infraestructura, transferencias tecnológicas, desarrollos y arreglos organizacionales, entre otros, fundamentales para liderar la transición energética, o al menos no quedar rezagados.

- Considerar la tecnología asociada a ZLD (*Zero Liquid Discharge*)²³ en el proceso de desalinización, o en su defecto la recuperación de compuestos de interés a partir del concentrado o rechazo.
- Aumentar los esfuerzos en optimizar el consumo de energía en el bombeo del agua desalada hacia la planta. Podría plantearse el uso de hidrógeno verde.
- Proyectar que la desalación por osmosis inversa será con nano membranas, membranas con inclusiones de grafeno y membranas ABM.
- Responder a desafíos tecnológicos para la correcta medición de extracciones de agua y plataformas de gestión de la información recopilada.
- Promover cambios institucionales que faciliten la constitución de Comunidades de Usuarios de Cuenca activas, con capacidad de gestión.
- Monitorear ecosistemas: identificar indicadores, desarrollo y despliegue de tecnologías y gestión de información.
- Crear, en las empresas mineras, una unidad de uso sustentable del recurso hídrico.

23..
Zero Liquid Discharge o descarga cero de efluentes. Enfoque que apunta al reúso total de los efluentes de procesos industriales, sin generar residuos líquidos al medio ambiente o alcantarillados.

3.3.1 ESTIMACIÓN DE INVERSIONES

Existen varios ejemplos de zonas geográficas donde se instalaron proyectos individuales de plantas desaladoras, sin aprovechar sinergias. Es el caso de los desarrollados en la cuenca de Copiapó como: Mantos Verdes, CAP-Cerro Negro, Candelaria, y los proyectos en desarrollo para El Morro, Santo Domingo y Caserones. Además, se suma la planta desalinizadora para servicio público de agua potable que construyó ECONSSA en Atacama, que no pudo capturar economías de escala en beneficio de la población.

En los proyectos de desalación e impulsión de agua cruda se generan importantes economías de escala y también impactos ambientales, en particular en la disposición de salmueras. Por ello se requiere promover proyectos que beneficien a múltiples usuarios y una planificación de la localización de las captaciones en el borde costero.

La institucionalidad existente ha sido insuficiente para abordar el desarrollo eficaz de estas inversiones indispensables para la sostenibilidad de las actividades mineras.

Se propone evaluar la creación de una institución similar al Coordinador Eléctrico Nacional, el Coordinador Nacional de Cuencas, con las siguientes responsabilidades:

- Realizar un Plan Indicativo de Desarrollo de aprovechamiento de aguas, incluyendo cantidad, tipo y ubicación de proyectos de producción de agua cruda (desalada) y los sistemas de impulsión y distribución.
- Coordinar la operación de producción y transporte de agua en la cuenca.
- Garantizar el acceso a los sistemas de transporte.

- Garantizar la calidad de servicio y seguridad de abastecimiento.

Si bien cada actor tiene la libertad de decidir el tipo y ubicación de proyectos de producción, el plan indicativo le ayudará a ver dónde capturar economías de escala, compartiendo instalaciones de respaldos y de conducciones, además de hacer más expedita las aprobaciones de usos de suelo, resoluciones de impacto ambiental y otros permisos sectoriales. Idealmente, debería considerarse la conducción de agua como servicio público y ser concesionada. Para estos efectos, se puede utilizar un marco institucional conocido, la ley de concesiones de obras públicas, que puede quedar establecido por ley con la obligación de coordinación con el Coordinador Nacional de Cuencas.

La interacción sinérgica entre aguas desaladas, aguas servidas tratadas y aguas de fuentes naturales con posibilidades de generar “*swap*” para reducir costos de impulsión, compartir acueductos para impulsión de aguas servidas tratadas y desaladas, entre otras opciones, torna imprescindible fortalecer la coordinación entre los subsistemas. Por eso, esta estrategia debe acompañarse de un fortalecimiento de la institucionalidad de gestión de recursos hídricos en general. Actualmente existe una multiplicidad de organizaciones escasamente coordinadas. Desde hace más de una década está pendiente la estructuración de una Subsecretaría de Recursos Hídricos, en el Ministerio de Obras Públicas, con responsabilidad de política y coordinación más amplia con los diferentes actores públicos involucrados. La experiencia del sector eléctrico es un modelo interesante de considerar, como meta a mediano plazo.

Actores

Se propone que participen productores de agua, transportistas de agua, empresas mineras, empresas de servicios sanitarios, la “empresa pública Desarrollo País o la futura Banca Nacional

de Desarrollo” (Fondo de Infraestructura), agricultores (demanda de riego). El Coordinador Nacional de Cuencas se puede estructurar como una corporación de derecho público independiente, dirigida por un cuerpo colegiado elegido en consideración de méritos.

3.3.2 OTROS REQUERIMIENTOS

De acuerdo con los componentes analizados se diferencian requerimientos puntuales en términos de financiamiento y otras variables.

Estudio para la sistematización de información existente

Se requiere información que sustente los nuevos proyectos o decisiones relevantes que demande el cumplimiento de este desafío. Es necesario evaluar la información existente a través de una investigación de síntesis y sistematización. Se debe incluir la información levantada por compañías mineras, sistemas como DGA y SEA. De esta manera se busca disponer de estudios existentes de cuencas y facilitar la actualización de la información. El financiamiento para este estudio debiera provenir de fondos público-privados.

Levantamiento línea de base

Realizar levantamiento de forma transversal, considerando territorios y ecosistemas.

Pasivos ambientales

Evaluar y proponer soluciones a los pasivos ambientales que requieran intervención, ya sea por el nivel de daño actual o los posibles impactos futuros de la actividad minera o aquellos provocados por el cambio climático. Identificar, cuantificar y recuperar ecosistemas que potencialmente podrían ser impactados. Es necesario identificar dueños de pasivos abandonados que permitan establecer las responsabilidades correspondientes. El financiamiento para este estudio

debiera provenir de fondos público-privados.

Brechas

Estudios de caracterización de brechas que debieran concluir con propuestas para el cierre de las brechas levantadas. Se requiere información legítima y comprensible.

Nuevos proyectos

Incorporar la dimensión ambiental en etapas tempranas de nuevos proyectos, impulsar los análisis de información ambiental del área o región donde será implementado, previo a los estudios ambientales correspondientes (pertinencia, DIA, EIA, permisos). Financiamiento de carácter privado a realizar por los titulares de los nuevos proyectos.

Litio

Realizar estudio para vincular la experiencia de la extracción de litio desde salmuera proveniente de salares, con la posibilidad de obtener compuestos de valor desde la salmuera proveniente de plantas desaladoras. El financiamiento para este estudio debiera provenir de fondos público-privados.

Gestión de cuencas

Realizar investigación específica por cuenca (metaanálisis). El estudio puede ser desarrollado por instituciones académicas a través de programas de doctorado. Se sugiere trabajar con cuencas pilotos y luego escalar.

Infraestructura

Mejorar sistemas de monitoreo, sensorización y red de observación de calidad de agua en cuencas con actividad minera.

Desarrollar plataformas integradas de datos e información que permitan la colaboración entre los distintos miembros de las diversas cuencas. Esto requiere una discusión abierta sobre la propiedad de los datos y las nuevas regulaciones para su uso. Al mismo tiempo, es necesario considerar la colaboración internacional a través de esta plataforma.

Incentivar el desarrollo de nuevas tecnologías que permitan hacer más eficiente el proceso para carreteras de agua desalada. Es posible que se produzca la mezcla de distintos tipos de agua para distintas fuentes y usuarios.

Implementar sistemas de trazabilidad en eficiencia hídrica en operaciones mineras, inversión que debiera provenir del sector privado.

Comunidades, regulación ambiental y cambio climático

Estudiar cambios regulatorios que permitan que las juntas de vigilancia puedan fiscalizar y entregar la información recolectada. Asimismo, fortalecer las capacidades de las comunidades locales para mejorar el entendimiento de la información levantada y reportada.

Cerrar brechas de información y capital humano a nivel de comunidades, que permita a los proyectos avanzar sin dificultades (o con menores dificultades).
Desarrollar regulaciones que permitan la compensación (o intercambio) de agua. Por ejemplo, agua desalada para las comunidades que viven a baja y media altura, y agua de acuíferos a mucha altura para yacimientos sobre 4,000 msnm.

Hacer un catastro nacional de infraestructura minera y de soporte a la minería existente (en operación y en abandono), sobre el cual se realice un análisis de riesgo para determinar las brechas de adaptación a escenarios climáticos. Para levantar el catastro se requiere

inversión público-privada; para el análisis de riesgo y brechas se requiere inversión e iniciativa pública. No se estiman inversiones adicionales para el desarrollo de regulaciones, las cuales estarán a cargo del poder ejecutivo y legislativo. Para el desarrollo de estándares de control y mantención, la inversión debería provenir desde la industria, en conjunto con fuentes extranjeras asociadas y las compañías proveedoras.

Integrar y fortalecer las redes de monitoreo existentes, públicas y privadas, para establecer una red nacional con información confiable, data robusta y en línea. El Estado debe invertir en las nuevas estaciones de monitoreo y modelos de escenarios climáticos que sirvan de línea base estándar para la adaptación y evaluación de futuros proyectos.

Fomentar el desarrollo de hidrógeno verde o instalaciones de autonomía energética. Se requieren inversiones privadas y apoyo público para el fomento de este tipo de iniciativa. Y adicionalmente, aportes desde fondos internacionales de inversión como el BID, empresas relacionadas y fondos concursables asociados a adaptación al cambio climático. Para el desarrollo de las mesas de trabajo no se visualizan inversiones.

Realizar estudios de riesgo para determinar los cambios requeridos para prevenir potenciales impactos ambientales asociados a eventos de cambio climático, en términos de entender el comportamiento de ecosistemas y otras variables ambientales para proponer nuevas formas de monitoreo y remediación y definición de planes de cierre adecuados a los nuevos escenarios. Se requiere inversión pública para la revisión y actualización de estándares de los distintos organismos competentes (SEIA, Sernageomin, DGA, Conaf, otros) e inversión privada para la actualización e implementación de los planes correspondientes.

Se requiere inversión de los gobiernos regionales para la conformación y coordinación de las mesas de trabajo.

El Estado debe generar instrumentos de fomento a la minería verde, considerando las posibles restricciones asociadas al cambio climático. Estos instrumentos debieran ser considerados en las evaluaciones técnico-económicas de privados para nuevas inversiones.

Encadenamientos y desarrollo productivo

Para el desarrollo de los estudios propuestos será necesaria la contratación de empresas consultoras de ingeniería y/o consultoras medioambientales. Entidades académicas, centros de investigación y empresas de tecnología pueden realizar algunos de los estudios mencionados y, además, trabajar en el desarrollo de las plataformas digitales requeridas para la captura, almacenamiento y reportabilidad de la información levantada.

El fortalecimiento de las capacidades en comunidades locales permitirá el trabajo colaborativo para el monitoreo y control ambiental de las variables relevantes para la cuenca. También se requerirá el acompañamiento de consultoras de ingeniería y desarrollo conjunto de herramientas con empresas proveedoras, como, por ejemplo, nuevos equipos para la red de monitoreo (sensores).

Se requerirá de coordinación e interacción entre actores públicos y privados de la industria minera, gobierno, comunidades, distribuidoras y generadoras de energía, y proveedores de insumos. Potencial encadenamiento productivo para la adaptación del cambio climático regional en empresas y comunidades, creación clúster de adaptación al cambio climático.

I+D+i

Desarrollar y pilotar tecnologías para el tratamiento de pasivos ambientales. La colaboración con centros tecnológicos, universidades y centros de pilotajes es fundamental.

Maximizar esfuerzos para mejorar la precisión en la minería a través de tecnologías, digitalización y robótica, entre otros.

Impulsar investigaciones en universidades y centros tecnológicos, asociadas al desarrollo de modelos predictivos de escenarios climáticos.

Investigación y desarrollo de la eficiencia, continuidad operacional, regulaciones, factibilidad de uso y nuevas infraestructuras, de nuevas fuentes de energía en las operaciones mineras.

Capital humano

Formar personal especializado a nivel regional, para el mantenimiento de los equipos de la red de monitoreo y sistemas asociados.

Desarrollar un nuevo ecosistema de emprendimiento, asociado a la infraestructura, manejo de datos, simulaciones, IOT²⁴, etc.

Promover un potencial nuevo mercado para el desarrollo de nuevas tecnologías y modelos de negocio asociados a la industria del Hidrógeno verde.

Potenciar nuevos clústeres con la participación de comunidades para proporcionar productos y servicios que aseguren la continuidad de actividades productivas de las comunidades y la continuidad operacional de la minería.

3.4 SUPERACIÓN DE BARRERAS

A continuación, se describen las barreras principales que fueron identificadas.

24. IOT: Internet of things o internet de las cosas. Concepto que se refiere a una interconexión digital de objetos cotidianos con internet.

3.4.1 FINANCIAMIENTO

- Considerar el desarrollo de actividad público-privada, para grandes inversiones.
- Tener en consideración que no ha existido conexión entre minería y obras públicas, déficit que se debe abordar.

3.4.2 SOCIO CULTURALES

- Discusión constitucional puede ser una oportunidad de contar con un marco institucional legítimo, a nivel nacional, considerar conversaciones necesarias a desarrollar.
- Proyecto de modificación de los derechos de agua. Repartición del agua, asignación de recursos hídricos para la actividad minera. Propuesta para diálogo entre usuarios de agua. Trabajo transparente, gobernanza real.
- Plan de ordenamiento territorial, ¿cuál será el espacio para la minería para permitir la coordinación de los distintos actores? Ley de regionalización.
- Sistema de concesiones, catalizador de catastro y síntesis de información asociada a los derechos de agua.
- Trabajo de cooperación público-privado, confianza, percepción de comunidades, el Estado debiera ser quien genera esta confianza.
- La afectación de comunidades por el cambio climático va más allá de la minería, visión holística. Experiencias y conocimiento desarrollado por compañías mineras y otros actores podría ser un aporte al desarrollo de las comunidades.
- Captura de interés de talentos en temas

tecnológicos, máxima tecnificación, precisión, eficiencia, digitalización.

- Establecer y fortalecer instancias de diálogo.
- Hacerse cargo de la reparación de ecosistemas afectados o pasivos que hoy no tengan un responsable conocido. Cómo se trabaja para reparar impactos ya generados

3.4.3 INSTITUCIONALES

Establecimiento de franjas para carreteras hídricas y de agua desalada. (institucional/sociocultural. Podrían utilizarse zonas públicas, fajas viales). Considerar de manera diferenciada cuando se trate de obras de mitigación.

Regulación que incentive la adecuación al cambio climático. Iniciativas tipo "Adopta un relave"²⁵o evaluar Incentivos tributarios.

Las evaluaciones ambientales incluyen adecuación al cambio climático en las guías. El procedimiento de evaluación ambiental engorroso y burocrático no permite incluir temas adicionales (Art. 36 reglamento Cambio Climático).

Mitigación de impacto ambiental en sitios que cuentan con pasivos (no propios) versus zonas sin afectación, evaluación diferenciada. (Ventajas en tramitación ambiental, valorizar sitios ya intervenidos). Revisión de normas que no permiten uso de estos sitios.

3.5 COORDINACIÓN CAPÍTULO 3

Heidy Jofré y Juan Carlos Román, Alejandra Sther, Alex Godoy, Carlos Silva, Cristián Cintoselli, Cristóbal Girardi, Dennis Vega, Hugo Valdés, James Mcphee, José Tomás Morel, Juan Ignacio Guzmán, Karla Lorenzo, Leandro Voisin, Lorena Cornejo, Marcela Bocchetto, María Cristina Betancour, Mariana Concha, Osvaldo Urzúa, Priscilla Ulloa, Ulrike Broschek, Víctor Pérez.

25.
Plan de relaves.
<http://www.plan-derelaves.cl/>

BIODIVERSIDAD PARA OPERACIONES MINERAS SOSTENIBLES

Las actividades mineras han tenido impacto en los ecosistemas de cuencas endorreicas, como bofedales, vegas y salares, y la pérdida de glaciares producto de la apertura de caminos y explotación del mineral. Consecuentemente, se han perdido o disminuido servicios ecosistémicos y se han desplazado, desaparecido o reducido formas de vida humana local. Los beneficios de los servicios que proveen los ecosistemas disminuirán sustancialmente para las futuras generaciones, a menos que se tomen medidas para revertir las tendencias actuales. De no hacerlo, en los próximos 50 años podría haber una aceleración de su degradación.

Este capítulo hace propuestas para restaurar ecosistemas dañados junto con medidas y acciones que prevengan nuevos impactos, poniendo particular énfasis en el impacto de la desalación, actividad que se ve incrementada con el objetivo de proveer recursos hídricos para la minería.

4.1 ÁMBITOS DE ACCIÓN

4.1.1 COMPONENTES

La biodiversidad ha sido definida como la variedad de genes, especies y ecosistemas que existe en la naturaleza. Específicamente, la biodiversidad se describe y analiza dentro de un esquema jerárquico de niveles de organización biológica, que va desde genes hasta paisajes, distinguiendo tres atributos: composición, estructura y función.

Los diferentes niveles de la biodiversidad y sus atributos han estado sujetos a cambios por los efectos crecientes de la actividad humana, al punto que se habla de la era del Antropoceno y se asocia a una potencial extinción masiva de especies en las próximas décadas²⁶, junto a importantes cambios climáticos, cuyos efectos se manifiestan a diferentes escalas²⁷.

Las acciones que están originando las mayores pérdidas de biodiversidad tienen que ver con cambios en el uso del suelo y la pérdida de hábitat nativo asociado, las invasiones biológicas y la explotación no sustentable de los recursos naturales, generando a nivel global importantes impactos sobre la biodiversidad²⁸, muchos de los cuales pueden ser minimizados. Por tanto, es prioritario reconocer el valor esencial y la relación que tienen las sociedades con la naturaleza, en el sentido que conforman sistemas socio ecológicos integrados y complejos, por lo mismo, para cuidarla es imperativo valorar, conocer, proteger, restaurar y promover la biodiversidad nacional.

4.1.2 MINERÍA Y BIODIVERSIDAD EN CHILE

La actividad minera en Chile se desarrolla a lo largo de una gran extensión geográfica latitudinal y altitudinal. A menudo, los yacimientos se encuentran en áreas con ecosistemas ambientalmente sensibles y singulares,

26. IPBES. (2019). Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services.

27. Intergovernmental Panel on Climate Change. (2018). Global warming of 1.5°C. <http://www.ipcc.ch/report/sr15/>

28. Durán, A. P., Rauch, J., & Gastón, K. J. (2013). Global spatial coincidence between protected areas and metal mining activities. *Biological Conservation*, 160, 272–278. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2013.02.003>

los que pueden estar representados a lo largo y ancho de una misma cuenca, como lo es la zona alto andina y andina y los ecosistemas mediterráneos, cuyas condiciones de vulnerabilidad ante los actuales patrones de cambio climático ejercen una presión sinérgica frente al uso de agua continental durante décadas por la actividad minera.

La minería, en sus procesos de exploración y explotación, genera grandes movimientos de materiales que implican cambios relevantes en el paisaje y los hábitats de las especies. Por otra parte, el uso de agua continental puede llegar a producir cambios, en algunos casos irreversibles, como lo que ha acontecido en sistemas superficiales de vegas, lagunas, bofedales y salares, o sobre sistemas subterráneos particularmente en las regiones de Tarapacá, Antofagasta y Atacama. Además, el uso de agua continental sumado a los efectos derivados del cambio climático, han generado distintos grados de afectación, con efectos acumulativos y sinérgicos.

La gran sequía que afecta al país en los últimos años, producto del cambio climático, ha generado, la disminución de la disponibilidad de agua continental, lo que ha propiciado el avance progresivo del uso de plantas desaladoras como una alternativa para obtener agua para los procesos mineros. No obstante, la instalación y operación de dichas plantas nos exige acelerar procesos de planificación territorial e investigar para evitar o revertir posibles impactos negativos sobre la biodiversidad y las actividades de las comunidades costeras.

En este contexto, la institucionalidad ambiental ha desarrollado varias guías para ser consideradas por parte de titulares de proyectos, en el marco del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) como la reciente Guía sobre lineamientos técnicos mínimos para la Evaluación ambiental de proyectos industriales de desalación en jurisdicción de la Autoridad Marítima²⁹. A pesar de ello, las líneas de base,

los modelos y las medidas, así como las evaluaciones por parte de la autoridad ambiental, han estado lejos del objetivo principal del SEIA: “un instrumento de gestión ambiental de carácter preventivo que permite a la autoridad determinar antes de la ejecución de un proyecto si: a) Cumple con la legislación ambiental vigente y si b) se hace cargo de los potenciales impactos ambientales significativos”. Esto nos demuestra la complejidad de los sistemas ecológicos y las brechas que aún no cubrimos como país, tanto respecto de la sostenibilidad de las actividades productivas en sistemas ecológicos, como de la escasa investigación como bien público que ha generado el sector minero, para abordar con menor incertidumbre y objetividad los efectos de la industria minera en los territorios.

Algunos ejemplos emblemáticos:

- La restauración de humedales que debe ser documentada y desarrollada bajo el conocimiento científico y con la participación de las comunidades, para utilizar el conocimiento ecológico de manera de integrar el saber que está en los territorios y hacerlo converger con el conocimiento científico empírico .
- Evaluar la efectividad de las medidas comprometidas en el SEIA en el marco de las compensaciones de biodiversidad resulta fundamental de manera de perfeccionar aquellas medidas exitosas de manera de caminar hacia estándares o guías que permitan recoger todo el conocimiento adquirido y compartirlo a través de mecanismos de comunicación abierta.

Existen algunos avances importantes en relación con compromisos ambientales y de investigación realizados por algunas compañías mineras, pero que aparecen como iniciativas aisladas y no se reflejan como un cambio de la industria minera en su conjunto.

29.
DGTM Ordinario
12600/05/1447
VRS 15 de noviem-
bre 2021

Con todo, existe una creciente conciencia de que un desarrollo sostenible debe incorporar los impactos sobre la biodiversidad y, en el caso de la minería, existe una oportunidad y obligación ética con los territorios socio-ecológicos, haciendo efectiva la ganancia neta positiva³⁰ sobre la biodiversidad, el cuidado de los entornos sociales y la equidad ambiental.

Demostrar un compromiso en estos aspectos es esencial para la sostenibilidad, la resiliencia y adaptación, así como para la reducción del riesgo social y ambiental, los que actúan sinérgicamente, condicionando un futuro posible para todos, en forma equitativa. En este contexto, el sector minero y metalúrgico (que incluye a compañías mineras, gobierno, proveedores y universidades y centro tecnológicos entre otros) debe hacer todos los esfuerzos para revertir la actual situación de crisis.

4.2 SUPERACIÓN DE BARRERAS

4.2.1 FORTALECER LA INSTITUCIONALIDAD AMBIENTAL EN EL MÁS BREVE PLAZO

El Estado debe comprometer la creación de un Servicio de Biodiversidad y Áreas Protegidas, reduciendo incertidumbres y dispersión, y definiendo con claridad acciones de conservación dentro y fuera de las áreas protegidas, con un amplio espacio para el involucramiento de la sociedad civil y las empresas. Asimismo, debe aumentar el conocimiento con mayor capacidad institucional, como también, mejorar los parámetros y criterios del SEA para hacer de la institucionalidad ambiental un espacio de credibilidad, de protección ambiental y de certezas. Aplicar efectivamente la jerarquía de mitigación a los proyectos mineros, poniendo un fuerte énfasis en las

acciones preventivas (evitar y minimizar impactos) como primera prioridad, y dejando aquellas de remediación (reparación y compensación) sólo como la excepción.

Vincular el conocimiento científico creado al amparo del Servicio de Biodiversidad y Áreas Protegidas, en una fuente reconocida de alto estándar, para ponerla a disposición de la comunidad nacional e internacional, inserto en un círculo virtuoso de conocimiento con otras entidades latinoamericanas y del resto del mundo, exportando y creando conocimiento basado en la ciencia.

Áreas de conocimiento

Algunas áreas de conocimiento que aún presentan deficiencias son los efectos de la desalinización sobre los ecosistemas marinos; las relaciones hidrogeológicas en diversos tipos de humedales en cuencas endorreicas y exorreicas; la evolución de hábitat críticos para la biodiversidad y restauración de humedales.

La implementación de redes de conocimiento o centros de investigación interdisciplinarios con universidades regionales y organizaciones especializadas en la práctica de la conservación, para crear plataformas de conocimiento integrado permanente, puede ayudar a cubrir brechas y favorecer procesos complejos, basados en enfoques adaptativos.

Es necesario ampliar el estado del conocimiento de la biodiversidad, en especial en macrozonas donde opera la minería, con el fin de cerrar brechas respecto a la respuesta hidrológica de diversos ecosistemas frente a sus usos, actualizar estudios sobre distribución de especies y comportamiento ante cambio climático. Responder qué, dónde y cómo están desplegadas en el espacio geográfico distintas dimensiones de la biodiversidad (especies, ecosistemas) y algunos servicios (captura de carbono, regulación/provisión agua).

30.

La pérdida neta de biodiversidad constituye el principio central de la compensación óptima de biodiversidad. Se refiere a que el efecto adverso identificado (pérdida de biodiversidad) sea equivalente al efecto positivo (ganancia de biodiversidad), tal como lo señala el artículo 100 del Reglamento del SEIA, promoviendo una pérdida neta nula en biodiversidad producto de la implementación de proyectos o actividades de desarrollo. La pérdida se refiere a la diferencia entre la situación de la biodiversidad sin proyecto y la situación de la biodiversidad con proyecto una vez implementadas las medidas de mitigación y reparación (impactos residuales).

4.2.2 BIODIVERSIDAD, CAMBIO CLIMÁTICO, TERRITORIO Y COMUNIDADES

Sistemas socio-ecológicos³¹: Articular ejes como el de biodiversidad con comunidades y sus territorios, en especial pero no exclusivamente, con pueblos indígenas, estudiar efectos del cambio climático, la adaptación a nivel local, estudios socio-ecológicos que permitan comprender efectos de intervenciones y oportunidades para el cambio, la recuperación, la valoración del capital social y conocimiento ancestral como elemento relevante de la tarea de gestión de conservación, protección y restauración de la biodiversidad.

La industria minera puede promover activamente la implementación de Soluciones basadas en la Naturaleza³²(SbN) para abordar sus impactos actuales e históricos, así como para hacer aportes voluntarios que apunten hacia el bien común de los territorios en que se inserta. Esto no es más de lo mismo, requiere acciones concertadas.

Los desafíos mencionados requieren el compromiso ambiental del sector minero y el desarrollo de conocimiento e integración de datos de manera de lograr una ganancia neta positiva sobre la biodiversidad. Sin embargo, este no será solo un desafío de las compañías mineras; el sistema económico y de desarrollo del país debe transitar hacia un mayor cuidado de ecosistemas y biodiversidad, con un rol activo del Estado, el que además debe proveer bienes públicos que faciliten la acción colectiva y la confianza. Es ya un hecho que los mercados están demandando en forma creciente la trazabilidad de la forma como se produce cobre y otros metales, incorporando aspectos de biodiversidad que deberán ser abordados tempranamente.

4.3 METAS

Algunas empresas han comprometido mejoras en su desempeño en la conservación de la biodiversidad, como lo manifiesta el Marco de Desarrollo Sostenible del ICMM, lo que implica acciones para la conservación y restauración de la biodiversidad. No obstante, en el contexto anteriormente expuesto se propone trabajar territorialmente sobre los siguientes temas:

- Actualizar el estado del conocimiento de biodiversidad en áreas donde opera la minería. El 2022 se ejecuta la evaluación de la información disponible y se identifican las brechas de información. El 2023 - 2024 se ejecutan los estudios necesarios para cubrir las brechas de información y se inicia la puesta en marcha de la plataforma de monitoreo de la biodiversidad del Ministerio del Medio Ambiente (Sistema de información y monitoreo de la biodiversidad, SIMBIO). El 2025 se inicia la apertura de la información a través de plataforma open-data.
- Desarrollar líneas de investigación, para ampliar el conocimiento y comprender de mejor manera el posible efecto de la operación de campos de pozos subterráneos sobre acuíferos actuales y abandonados, asociadas a distintos tipos de ecosistemas. Se busca generar información que sirva de base para posteriores mecanismos de recuperación de estos ecosistemas.
- Estandarizar información sobre biodiversidad y acceso a través de sistemas públicos disponibles. El 2022 se identifican las brechas de conocimiento y se inician y complementan las plataformas digitales de información de biodiversidad marina y terrestre, protocolos para la curatoría de datos. El 2023 se concluyen guías para el monitoreo y evaluación con altos estándares. El 2024 se oficializan las guías de estudios actualizadas y nuevas.

31.

Los sistemas naturales y humanos acoplados son sistemas integrados y complejos en los cuales la naturaleza y los humanos interactúan (Liu et al. 2007), estos sistemas también son conocidos como sistemas socio-ecológicos (SSE) o socio-eco-sistemas.

32.

Concepto que abarca todas las acciones que se apoyan en los ecosistemas y los servicios que estos proveen para responder a diversos desafíos de la sociedad como el cambio climático, la seguridad alimentaria o el riesgo de desastres.

- Aumentar el conocimiento de la biodiversidad marina asociada a la operación de plantas desaladoras producto de la toma y las descargas de agua de mar de las plantas desaladoras y su efecto sobre la biodiversidad.

- Establecer un sistema de monitoreo público-privado para conocer el comportamiento de las descargas y toma de agua de mar desde las plantas desaladoras y su impacto sobre la biodiversidad.

- Implementar sistemas de monitoreo en tiempo real de humedales andinos y altoandinos, comportamiento de acuíferos y lagunas de salares. Existe un espacio de colaboración público-privado que es factible y apropiado para correcta gestión ambiental de los recursos. El registro, almacenamiento y análisis de datos tienen impacto ambiental positivo porque con ello será posible mejorar la gestión del agua y de los ecosistemas, así como comunicar y tomar buenas decisiones respecto del uso del agua, mejorar las políticas públicas y diseñar e implementar acciones pertinentes a las cuencas hidrográficas y territorios.

- Restauración de ecosistemas. El 2023 se identifican todos los estudios y proyectos relacionados con restauración. El 2024 se actualizarán las guías de restauración en función de la información recolectada. El 2025 se oficializan dichas guías.

Actualmente existen más de 700 relaves mineros en el territorio, muchos de los cuales están abandonados y generan impactos negativos sobre la biodiversidad. En este contexto, es necesario fortalecer acciones del Estado, por ejemplo, el Plan Nacional de Depósitos de Relaves³³ para acelerar su implementación a lo largo del país. Las universidades y centros de Investigación

nacionales inician proceso de desarrollo de mejores tecnologías para evitar impactos en ecosistemas marinos, terrestres y acuáticos continentales (incluidos salares, vegas y bofedales). Se inicia el proceso de reconversión para reducir y evitar impactos sobre ecosistemas marinos, terrestres y acuáticos continentales (incluidos salares, vegas y bofedales). El 2030 las compañías mineras han contemplado todas las medidas para el uso de la mejor tecnología existente.

- El Ministerio de Medio Ambiente evalúa un portafolio de Soluciones Basadas en la Naturaleza³⁴ (SbN) aplicables a zonas impactadas por actividades mineras: reforestación y restauración de ecosistemas con especies nativas, *blue carbon*³⁵ que mitiguen las emisiones de carbono, entreguen beneficios para la adaptación al cambio climático compensaciones y offsets de biodiversidad que tengan beneficios para los socio-ecosistemas. El 2024 se ejecutan los estudios necesarios para identificar el portafolio de SbN aplicables. Al 2025 se completa una evaluación económica y priorización de SbN. El 2026 se mapean las SbN priorizadas y se entrega la información a través de plataforma open data.

4 . 3 . 1 I + D + i

Para avanzar en las metas y acciones establecidas es necesario desarrollar capacidades en I+D+i, lo que requiere aumentar la inversión en I+D+i e incentivar el trabajo colaborativo entre industria, sector público, privado y academia. Para ello, todos los sectores deben trabajar en forma colaborativa en el desarrollo de diagnósticos, herramientas y soluciones al alero de iniciativas científicas conjuntas. La coordinación entre universidades o centros de investigación resulta crucial para esto, así como el traspaso de información

33.
Plan de relaves.
<http://www.plan-derelaves.cl/>

34.
Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN): consisten en utilizar las funciones de los ecosistemas para resolver los problemas relacionados al cambio climático.

35.
Blue carbon: Carbono almacenado en ecosistemas costeros y marinos.

de experiencias exitosas en la minería con estos mismos centros de investigación, de manera de evitar la duplicidad de esfuerzos y co-construir soluciones a partir de lo realizado. No obstante, se visualiza como clave promover la creación de centros de investigación interdisciplinaria que ayuden a fortalecer la capacidad instalada en I+D+i.

Finalmente, el desarrollo de sistemas o equipos como sensores remotos en línea o la integración de sistemas de medición en línea del sector privado con lo público, homologando sistemas de información, podría aumentar el conocimiento de la biodiversidad en las áreas donde se desarrollan las operaciones mineras.

4 . 3 . 2 G O B E R N A N Z A Y P L A T A F O R M A S D E C O N O C I M I E N T O

La complejidad que impone el calentamiento global y los cambios esperados sobre la biodiversidad requerirá de técnicos y científicos capaces de trabajar de forma multidisciplinaria y en colaboración con profesionales provenientes de diversas disciplinas, como la ecología, ingeniería, sociología, ciencias políticas y antropología, para entender cómo la biodiversidad se adapta y responde a los efectos del cambio climático y cómo, a través de las soluciones basadas en la naturaleza, se puede minimizar el impacto de las operaciones mineras y actuales. En este contexto es deseable contar con un programa de becas de doctorado para estudiantes interesados en cambio climático y minería.

4 . 4 C O O R D I N A C I Ó N C A P Í T U L O 4

Andrés Camaño, Alejandra Figueroa, Lohengrin Cavieres, Pablo Marquet, Osvaldo Urzúa.

PROCESAMIENTO DE CONCENTRADO, MINERÍA SECUNDARIA, RECICLAJE Y PASIVOS AMBIENTALES

Minimizar la generación de residuos y recuperar más elementos de interés económico es el primer paso hacia una mayor sustentabilidad de la actividad minera. Para ello es necesario estudiar y desarrollar soluciones innovadoras que permitan reducir, reciclar y reutilizar sus residuos y capturar valor en cada etapa. Asimismo, una industria metalúrgica eficiente y de última generación (nueva FURE) es clave para aprovechar una mayor fracción del valor generado en la minería, ya que un mayor procesamiento local impacta en el desarrollo industrial, tecnológico y social del país. Además, nuestro país contribuiría a bajar las emisiones GEI, ya que la matriz energética chilena es más “limpia” que la de China, principal destino de nuestras exportaciones de cobre.

5.1 ÁMBITOS DE ACCIÓN

La minería en Chile y en el mundo necesita profundos cambios para enfrentar las nuevas exigencias ambientales, tecnológicas y sociales. Simultánea y paradójicamente, este contexto requiere más producción de minerales, por lo que su adecuación es urgente.

El trabajo de este eje se divide en 3 ámbitos, todos los cuales requieren I+D+i, local y nacional para avanzar en la cadena de valor y de empleo calificado. Estos son:

- Relaves: Reducir la huella ambiental de los principales efluentes mineros
- Minería secundaria y economía circular: Mayor recuperación de valor contenido y nuevas soluciones que utilicen residuos para fines productivos.
- Generar nuevas fundiciones (FURE): Sustentables y competitivas, y una mayor capacidad de procesamiento en la cadena minero-metalúrgica.

5.1.1 RELAVES

Reducir la huella ambiental de los principales efluentes mineros

Considerando el carácter masivo de los relaves es impensable una valorización y eliminación completa del residuo. Por lo tanto, es necesario estudiar y desarrollar soluciones innovadoras que permitan el retorno de los relaves a la zona de extracción minera o a su entorno directo, asegurando su estabilidad física y química y una minimización de los impactos. Y en el largo plazo, habilitar una minería sin relaves.

Pero una minería verde debe hacerse cargo de los

pasivos que quedaron de las operaciones mineras del pasado. Los relaves, que constituyen los residuos mineros masivos más importantes, ilustran este desafío.

Las trágicas fallas ocurridas en depósitos de relaves en diferentes partes del mundo, en los últimos años, han concentrado la atención en garantizar la seguridad de su operación. Ello se traduce, desde ya, en la adopción de un nuevo modelo de gobernanza. La industria ya está avanzando en esa línea a través del Estándar Global de Gestión de Relaves para la Industria Minera³⁶ (*Global Industry Standard on Tailings Management, GISTM*) elaborado en el *International Council on Mining & Metals (ICMM)*.

Un segundo elemento clave en una operación más sustentable es el ahorro de insumos críticos, como el agua. Esto posibilita:

- Incrementar la recirculación de agua y reducir el consumo neto de agua fresca.
- Aumentar la estabilidad física y química de los depósitos.
- Alargar la vida útil de los depósitos al disminuir los volúmenes a depositar.

Otra oportunidad se refiere a la recuperación de elementos/minerales de valor desde los relaves o en las mismas plantas de procesamiento donde se generan. Aprovechando el alto grado de liberación de las partículas minerales, en muchos casos es posible recuperar aquellos elementos/minerales de interés no considerados en el procesamiento original.

Adicionalmente, se debe estudiar la eliminación de elementos/minerales potencialmente contaminantes antes de su disposición final, generando un residuo inerte que puede reutilizarse en obras civiles, rellenos o cubiertas de otros residuos, o en la elaboración de materiales geopolímeros, entre otros.

A modo de ejemplo, remover minerales como la pirita reduce el potencial de generación de drenaje ácido y permite remover otros potenciales contaminantes (metales pesados). Un concentrado de pirita puede además ser una fuente de metales estratégicos como cobalto, cuya recuperación genera ácido sulfúrico, insumo con valor económico.

Todos estos esfuerzos pueden aplicarse también a los depósitos de relaves abandonados y no operativos, tomando como base la Política Nacional de Depósitos de Relaves³⁷. La recuperación de elementos o compuestos de valor permitiría absorber parte de los costos de reprocesamiento y re-depositación de los relaves en condiciones ambientalmente más seguras. Para los relaves del futuro se visualiza un escenario aún más desafiante. El creciente rechazo hacia los depósitos de relaves volverá cada vez más difícil la aprobación de nuevas zonas de depositación por la dificultad de obtener una licencia ambiental y social.

Una vía por explorar en forma sistemática, colaborativa y de largo plazo es apuntar a una minería que minimice los relaves y/o los elimine allí donde sea posible. Para ello se visualizan, dependiendo los plazos, diversos caminos:

- La transformación completa de los procesos, reemplazándolos por ejemplo por la lixiviación in situ. Esto implica desarrollar formas de lixiviar depósitos de sulfuros, secundarios y primarios.
- El retorno de los relaves a la mina. Esto se aplica, en forma parcial, en el relleno con relaves espesados de caserones o de rajos fuera de operación y con una configuración o layout conveniente para esta opción. Sin duda se requiere desarrollar nuevas técnicas y/o tecnologías de transporte de pulpa más eficientes.
- La transformación sustentable de los relaves

36.
<http://www.icmm.com/en-gb/stories/2020/gistm-new-global-benchmark>

37.
Plan de relaves.
<http://www.plan-derelaves.cl/>

en un material distinto, de manejo más simple y seguro, que pueda utilizarse en construcción o como materia prima para otros procesos, por ejemplo, en la fabricación de fertilizantes.

5.1.2 MINERÍA SECUNDARIA

Mayor recuperación de valor contenido y nuevas soluciones que utilicen residuos para fines productivos

La industria minera se encuentra cada vez más exigida en términos de producción sustentable. Un cambio profundo de paradigma tiene que ver con el fin de un enfoque productivo lineal resumido en extraer, producir y botar, y su reemplazo por la circularidad, basada en minimizar la extracción de nuevos recursos.

Vincular a la minería como agente de tracción de la economía regional, para reducir, reciclar y reutilizar sus residuos y capturar valor en cada etapa permitiría fortalecer vínculos y generar valor compartido empresa-comunidad. Ello, a través del empleo, encadenamientos productivos, capacidades tecnológicas y acceso al know-how de nuevas tecnologías, entre otras. En la sección **ANEXOS, A.1 IDENTIFICACIÓN DE RESIDUOS** se detallan los residuos generados por la industria minera en las distintas etapas del proceso.

El reciclaje de metales, si bien es una actividad muy dinámica en los últimos años y que crecerá más aún, generará una oferta que alcanzaría para satisfacer no más de un 5% de la demanda de metales en los próximos 15 años³⁸.

En Chile, el borrador de propuesta para la Hoja de Ruta a la Economía Circular, elaborado por el Ministerio de Medio Ambiente, mostró los resultados de talleres regionales que identifican los sectores prioritarios para la transición a la economía circular. La minería, sector de gran importancia para Antofagasta aparece como de alto potencial para encabezar dicha transición, situación que se refleja en la Ilustración 5.

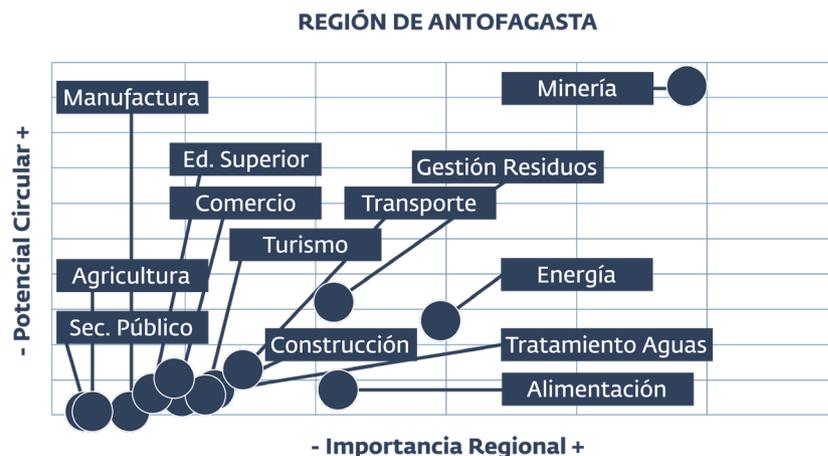


Ilustración 5: Prioridades identificadas en taller desarrollado para la Hoja de Ruta de la Economía Circular.

La minería genera grandes volúmenes de residuos, que podemos distinguir según la etapa del proceso:

- Sector Mina: desde la explotación del yacimiento hasta la entrega de material a chancado/molienda o preparación material.
- Procesamiento/residuo: desde el chancado/molienda hasta la flotación o lixiviación del mineral ya acondicionado. Aquí se considera hasta las pilas de lixiviación y la generación de PLS, rípios y relaves.
- Residuos Refinación/Fundición: la transformación de concentrados de cobre a ánodo/cátodos y la producción de cátodos por SX/EW.

Dentro del diagnóstico realizado en este ámbito, se identifican algunos desafíos que se mencionan a continuación:

38. Deloitte Sustainability. 2015.

Normativos

- Es necesario conceptualizar los residuos mineros masivos no peligrosos como potenciales subproductos, promoviendo su valorización final.
- Falta fomento al reúso y/o reciclaje, por existir una única alternativa que es la disposición final.
- Disparidad de criterios entre servicios con competencia en la materia y dentro de un mismo servicio, pero en distintas regiones.

Escala: grandes volúmenes de residuos

Los residuos generados en las diferentes etapas de los procesos mineros corresponden a miles de toneladas, por lo que las soluciones para su procesamiento requieren de una escala acorde a su producción.

Logística, distancias

La mayoría de los sitios de disposición final de los residuos mineros se encuentran lejos de los centros urbanos o de los puntos donde se puede generar su reutilización de manera masiva. Por eso, los proyectos de valorización no siempre son rentables.

Poca asociatividad

En general, las empresas mineras tienden a resolver de manera interna la disposición de sus residuos ya sea, por contar con sitios autorizados o por contratos con empresas gestoras. Es muy escasa la colaboración entre compañías para compartir mejores prácticas y experiencias y buscar su aprovechamiento.

Tecnologías no escalables

Existe un abanico de tecnologías, en distintas fases de madurez, para valorizar los residuos. Sin embargo, se requiere que puedan probarse a escala industrial, lo que no es fácil de obtener, por falta de recursos

financieros, nexos con empresas y disponibilidad de sitios de prueba.

Falta de modelos/casos de negocio

Hoy en día, el de las compañías mineras es la producción de cobre, por esto se requiere de modelos de negocios atractivos que fomenten la valorización o el reciclaje de los residuos generados.

Condicionamientos del entorno

Se espera que, en los próximos años, las exigencias de mercado y las normativas jueguen un rol fundamental para un mejor aprovechamiento de los residuos. En esa perspectiva se consideran las siguientes dinámicas y gatilladores. En la sección **ANEXOS, A.2 DEFINICIÓN DE ESCENARIOS** se presentan los escenarios posibles.

- Trazabilidad de materias primas.
- Impuestos a estudiar.
- Licencia social para operar como parte de la toma de decisiones.
- Carbono neutralidad como meta país y compañías mineras.
- Residuos identificados, medidos y caracterizados.
- Minería con cero residuos.
- Simbiosis industrial.

5.1.3 GENERAR NUEVAS FUNDICIONES

Sustentables y competitivas, y una mayor capacidad de procesamiento en la cadena minero-metalúrgica

Una industria metalúrgica eficiente y de última generación es clave para aprovechar una mayor fracción del valor generado en la minería, ya que un mayor procesamiento local impacta en el desarrollo industrial, tecnológico y social.

Considerando, además, que la actividad de fundición es intensiva en energía y que la matriz energética chilena es más “limpia” que la de China -principal destino de nuestras exportaciones- al procesar en nuestro país contribuiremos a bajar las emisiones globales de Gases con Efecto Invernadero (GEI). También se reducirían las emisiones GEI al disminuir el volumen del transporte de concentrados y aumentar el de cátodos. Los GEI del transporte marítimo de concentrados se estiman alrededor de un 45% más altos, que los del transporte de cátodos.

Si la actividad minera refuerza sus características de enclave con una decreciente capacidad de generar valor directo, sigue arriesgando la percepción general de ser una actividad poco valorada y débil en términos de sostenibilidad, al basar su legitimidad principalmente en el pago de impuestos al Estado de Chile.

La obsolescencia de algunas fundiciones y la necesidad de no seguir retrocediendo en el mercado de refinados plantean la necesidad de construir una capacidad FURE del orden de 2 millones de toneladas de concentrados, con procesos eficientes y energías renovables, por ejemplo, hidrógeno. Para ser competitivas, las nuevas instalaciones deben tratar nuevos materiales, como la chatarra electrónica y recuperar subproductos que hoy se exportan en los concentrados o no son recuperados en las fundiciones locales.

Asegurar una capacidad de fundición y refinación local, capaz de competir en términos ambientales y de mercado con las fundiciones más avanzadas del mundo y que considera el uso de combustibles sustentables como hidrógeno para producir con una

mínima huella de carbono es el ambicioso desafío.

El deterioro en el procesamiento de concentrados de cobre está llegando a un punto de no retorno, arriesgando la pérdida de un eslabón crucial de la cadena de valor. Evitar este retroceso productivo es urgente y posible. Es urgente, por los cierres de fundiciones que ocurrirán en esta década por razones ambientales. Y es posible, estructurando un negocio razonable, diferente al negocio minero, para inversionistas/operadores de largo plazo. Esta decisión, que asume una operación con altos estándares tecnológicos y socio ambientales, es clave para retomar la senda de liderazgo productivo, sobre la base de que Chile es capaz de atraer la tecnología más competitiva del mundo y de mejorar su gestión productiva.

Las regulaciones ambientales que limitan la importación de concentrados de cobre con niveles altos de arsénico (As) favorecen una decisión de este tipo. A ello se agregan potenciales restricciones al transporte marítimo de los concentrados de cobre, al contener impurezas catalogadas como tóxicas, como arsénico y plomo, y que podrían afectar el costo logístico y restringir la oferta de naves.

La metalurgia es un conocimiento que Chile debiera resguardar y potenciar como desarrollo profundamente ligado a las nuevas exigencias de una mineralización cada vez más compleja. Tener fundiciones en Chile constituye una clara ventaja económica, por la penalización que se debe pagar por los altos niveles de arsénico que se producen en Chile, más de 20.000 toneladas al año. La recuperación de subproductos y el reciclaje de residuos también son muy importantes para mejorar los resultados. En definitiva, las FURE constituyen una base material para el emprendimiento, nuevos negocios, la investigación, la formación de nuevo capital humano y desarrollo tecnológico.

Un proyecto de esta naturaleza, abierto a las comunidades donde se instale, debería convocar a muchos actores a través de la participación en procesos de consulta pública para conocer, opinar y potencialmente apoyar y contribuir en conjunto a la co-creación de la nueva industria fundidora y refinadora de Chile.

5.2 METAS

A continuación, se presentan las metas al mediano y largo plazo de los distintos ámbitos trabajados.

5.2.1 RELAVES

Al 2030, incentivar el desarrollo de tecnologías que permitan depositar relaves con mayor concentración de sólidos, maximizando la recuperación y recirculación de agua y alargando la vida útil de los depósitos. Y establecer un marco legal y ambiental para poner en marcha un programa para reprocesar los que representan mayor riesgo y/o mayores contenidos de elementos o compuestos de valor, con una re-depositación de los nuevos residuos más segura para las comunidades y el medio ambiente.

Al 2040, remediar los depósitos cerrados y abandonados con riesgo para la salud de las personas y para los ecosistemas. Además, implementar alternativas para el cierre seguro y responsable de los depósitos de relaves, distintos de aquellos contenidos en la Ley 20.551³⁹, que regula el cierre de faenas e instalaciones mineras, minimizando los riesgos y los requerimientos de mantención y tratamiento y dándole un uso alternativo al área de los depósitos.

39.
SERNAGEOMIN.
Cierre de faenas mineras. Recuperado de: <https://www.sernageomin.cl/cierre-faenas%20mineras/#%3A~%3A-text%3DLa%20Ley%2020.551%20que%20Regula%20el%20Reglamento%20de%20esta%20Ley>

5.2.2 MINERÍA SECUNDARIA Y ECONOMÍA CIRCULAR

Vincular a la minería como agente de tracción de la economía regional, para reducir, reciclar y reutilizar sus residuos y capturar valor en cada etapa permitiría fortalecer vínculos y generar valor compartido empresa-comunidad.

Al 2030, habilitar un centro de minería secundaria en región minera evaluada, que considere un análisis en los ámbitos económico, social y ambiental. Y al 2040, reducir, reutilizar y reciclar un 100% de los residuos susceptibles de reciclar generados en operaciones mineras; reducir el stock de residuos mineros pasivos susceptibles de reutilizar (relaves, ripios, lastre, escoriales, etc.), en a lo menos un 90% por reutilización en reemplazo de áridos.

5.2.3 GENERAR NUEVAS FUNDICIONES

Entre las metas identificadas en este ámbito, se destacan:

- Reducir, reutilizar y reciclar el 100% de los residuos generados por las fundiciones, como escoriales y otros, incluyendo su estabilización física y química.
- Lograr la carbono neutralidad de todas las fundiciones y refinadoras de cobre que operan en el país.
- Desarrollar negocios en la cadena de valor de la metalurgia, nuevos materiales, pilotajes, subproductos, reciclaje, patentamiento, entre otros.
- Posicionar a Chile como líder en conocimiento y tecnología de procesamiento de minerales y

concentrados, integrando las cadenas desde la generación de conocimiento en investigación básica, hasta la exportación de tecnologías que incluyan ese conocimiento.

Al 2025, lograr una comunicación efectiva con las comunidades y concretar la aceptación y aprobación de los sectores potencialmente aledaños que sean candidatos para acoger la nueva capacidad de fundición en Chile. Garantizar un suministro de concentrados de cobre por parte de productores en condiciones competitivas para una futura capacidad de fundición y refinación.

Al 2030, implementar una nueva capacidad FURE en Chile capaz de tratar 3 millones de toneladas métricas secas (TMS) de concentrados de cobre y que se ubique en el primer cuartil de competitividad económica y socio ambiental entre las fundiciones del mundo. Al mismo tiempo, potenciar el uso de combustibles como el hidrógeno que reduzcan las emisiones de GEI y aseguren una producción con mínima huella de carbono.

5.3 SOLUCIONES TECNOLÓGICAS

5.3.1 RELAVES

Las principales soluciones y tecnologías para desarrollar se enmarcan en 2 ejes estratégicos.

1. Eje estratégico: Vigilancia Tecnológica / BAT (Best Available Technologies) / Adaptación de tecnologías existentes.

- Tecnologías de separación sólido/líquido y desagüe de los relaves que reduzcan el consumo de agua, aseguren una mayor estabilidad de los depósitos y alarguen su vida útil.

- Tecnologías del tipo ore sorting o clasificación selectiva de minerales orientadas a reducir la producción de relaves.

- Procesos de recuperación de elementos/minerales de valor.

- Proceso de despiritización e inertización de los relaves.

- Tecnologías de reutilización masiva de residuos finales en obras civiles, rellenos, etc.

- Procesos de control y remediación de infiltraciones.

- Cierre, relocalización o redepósito de relaves críticos y/o conflictivos en forma más segura para las comunidades y el medio ambiente.

- Tecnologías para el control del arrastre eólico de material particulado en depósitos de relaves.

- Desarrollo de alternativas de cierre de depósitos de relaves y habilitación para darle otros usos.

- Tecnologías para implementar un sistema de monitoreo en línea y transparente, tipo plataforma web, para depósitos activos, inactivos y abandonados, que permita responder preventivamente a potenciales anomalías.

- Tecnologías para simular escenarios en torno a los efectos del cambio climático sobre los depósitos de relaves.

2. Eje estratégico: I+D

- Tecnologías de disposición de relaves en minas (rajos y minas subterráneas).
- Minería sin depósitos de relaves.
- Transformación de los relaves en productos masivos comercializables y/o en un material inerte de fácil manejo y disposición.

El desarrollo de tecnologías debe ser adecuado y en escala a la magnitud de la actividad minera en Chile, proporcionando ensayos y pilotos representativos de los distintos tipos de minerales.

5.3.2 MINERÍA SECUNDARIA Y ECONOMÍA CIRCULAR

No se observan brechas tecnológicas. Se requieren nuevos modelos de negocios y coordinaciones que faciliten la relación entre la minería y otros actores productivos.

5.4 ESTIMACIÓN DE INVERSIONES

5.4.1 RELAVES

Se identifican diferentes líneas de inversión que se detallan a continuación:

Diagnósticos

Se necesitan diagnósticos para una mejor definición de los problemas y desafíos, una priorización o un levantamiento de oportunidades. En particular, se propone desarrollar las siguientes líneas de trabajo:

- Consolidar la información existente (catastro de Sernageomin, información del SEIA, reportes de sustentabilidad etc.) sobre depósitos de relaves en operación, fuera de operación, en etapa de cierre o abandonados.
- Elaborar un programa priorizado de pasivos mineros (depósitos de relaves fuera de operación o abandonados).

Estos programas se basan esencialmente en información existente y no requieren mayor inversión (<US\$ 50.000).

Vigilancia tecnológica

Buscar, captar, recolectar, analizar y seleccionar tecnologías disponibles para enfrentar los diferentes problemas y desafíos. Esta línea se relaciona directamente con los conceptos de Best Available Technologies (BAT) y de Benchmarking. Se propone desarrollar los siguientes estudios de vigilancia tecnológica y selección de tecnologías ambientalmente amigables que puedan aplicarse a gran escala:

- Tecnologías de separación sólido/líquido aplicables a gran escala para el espesamiento y la deshidratación de relaves.
- Tecnologías de caracterización de relaves para determinar oportunidades de recuperación de elementos valiosos y de compuestos potencialmente contaminantes.
- Tecnologías de recuperación de elementos, compuestos o materiales de interés económico y/o de elementos contaminantes a partir de los relaves.
- Tecnologías para la removilización de relaves antiguos.

- Tecnologías para el saneamiento ambiental y la reconversión de depósitos de relaves antiguos (pasivos mineros).

Este programa de vigilancia tecnológica es clave para definir las etapas posteriores, pero no requiere inversiones muy importantes. Se estima que una célula de vigilancia tecnológica con un presupuesto anual de US \$100.000 podría hacerse cargo de este programa.

Pilotaje

Programas de validación a escala piloto de tecnologías existentes o en desarrollo. Estos programas se pueden aplicar a las tecnologías seleccionadas a través de la vigilancia tecnológica. En particular, se propone desarrollar pilotaje de las siguientes tecnologías:

- Tecnologías de separación sólido/líquido.
- Tecnologías de separación y recuperación de elementos, compuestos o materiales de valor económico.
- Tecnología de separación y eliminación de elementos o compuestos contaminantes.
- Tecnologías de saneamiento ambiental y reconversión de pasivos mineros.
- Tecnologías de depositación de relaves en faenas mineras (retorno de relaves a la mina).

Estos programas deben financiarse a través de alianzas público-privadas que fomenten la validación y adopción de tecnologías más amigables con el medio ambiente. Los niveles de inversión requeridos para cada una de estas líneas de pilotaje tecnológico pueden variar entre US \$500.000 y US \$2.000.000.

Fondo de saneamiento de pasivos mineros

Destinado a financiar el saneamiento de pasivos mineros⁴⁰, reduciendo los riesgos para las personas y el medio ambiente, junto con recuperar superficies para nuevos usos. Este fondo requiere una inversión significativa y probablemente extendida en el tiempo. Por lo tanto, es imperativo buscar un mecanismo de financiamiento permanente. Sin embargo, es necesario demostrar primero su viabilidad técnica y ambiental, a través de un programa piloto. El programa piloto debería estar enfocado a 3 o 4 casos representativos y prioritarios.

I+D

Los programas de I+D de nuevas tecnologías no pueden depender solo de iniciativas y financiamiento público. Requieren, también, de una participación significativa del sector privado. Los mecanismos de financiamiento pueden ser variados, pero deberían incluir, entre otros, fondos concursables, núcleos temáticos de investigación, desarrollo y apoyo a la formación de consorcios colaborativos. Las líneas propuestas son:

- Desarrollar nuevos métodos de extracción y procesamiento que no generen relaves (minería sin relaves) o que reduzcan significativamente su volumen.
- Desarrollar procesos de transformación de los relaves en materiales que puedan ser utilizados sustentablemente en otras aplicaciones y/o en materiales inertes de fácil manejo y disposición.
- Desarrollar nuevas alternativas para el cierre sustentable de depósitos de relaves.

40. Las faenas mineras abandonadas o paralizadas, incluyendo sus residuos, que constituyen un riesgo significativo para la salud o seguridad de las personas, para el medio ambiente o para las actividades económicas sin dueño identificado.

Encadenamientos y desarrollo productivo

La gestión de los relaves se integra y seguirá dentro de los proyectos mineros que los generan. Una gestión innovadora permitiría reducir la huella ambiental y los costos de cierre. Adicionalmente, el uso de relaves en obras civiles o como materiales de relleno, su eventual transformación y reutilización como materiales de construcción o como materia prima para otros procesos son alternativas que abren la posibilidad de encadenamientos productivos y de desarrollo de nuevos negocios. Pueden apoyar también al desarrollo de infraestructuras locales, como, por ejemplo, en la mejora vial.

Una mayor recuperación de agua y una disminución de consumo neto de agua contribuyen a liberar recursos hídricos.

Finalmente, la rehabilitación de áreas ocupadas por relaves abandonados y nuevas alternativas para el cierre de los depósitos en operación permitirían nuevos usos del área para el desarrollo de actividades económicas compatibles (generación eléctrica solar, áreas de recreación, entre otras).

5.4.2 MINERÍA SECUNDARIA Y ECONOMÍA CIRCULAR

No se hizo una estimación de inversiones. El reciclaje y reutilización de estos residuos y su transformación en subproductos son desarrollos a la medida (*tailor-made*). El financiamiento puede provenir de fondos públicos, privados y extranjeros.

Encadenamientos y desarrollo productivo

Al generar relaciones colaborativas entre la minería y otras industrias se promueve la reutilización y reciclaje de materiales que hoy no son utilizados y se están desaprovechando. Por ejemplo, la reutilización de relaves, marinas y escorias como fuentes de áridos

para la generación de proyectos de infraestructura y vialidad.

Capital humano

Las metas relacionadas con la creación de nuevas empresas están directamente relacionadas con la generación de empleos, así como también con la conformación de un centro de minería secundaria. Por otro lado, los levantamientos de información requeridos pueden ser desarrollados por consultoras, universidades o centros tecnológicos existentes.

I+D+i

El trabajo conjunto entre compañías mineras, universidades y centros de investigación debe enfocarse en la búsqueda de tecnologías y soluciones acordes a la problemática planteada, es decir, valorizar el residuo, extraer elementos de valor, reciclar, cubrir la demanda de volumen requerido y consideraciones de logística, entre otros. También, fortalecer los modelos de negocio, analizando las empresas ya existentes con tecnologías probadas y listas para su uso a gran escala, e impulsar el desarrollo de aquellas que se encuentran en escala de madurez tecnológica más avanzadas para su aplicación.

5.4.3 GENERAR NUEVAS FUNDICIONES

La estimación para el CAPEX para una FURE de 1Mt/año es cercana a los MUS\$ 1.700 (no se consideran costos financieros) y un VAN asociado cercano a los MUS\$ 704⁴¹.

Encadenamiento y desarrollo productivo

Los principales aportes para la producción de 1 millón de toneladas serían: valor agregado, sobre los MUS\$2.000 por año. Se favorece la complejidad de la economía por adquisición de insumos y servicios.

41. Lagos. G; Valenzuela. I; Valdés. M; Jara. J; Salas. J; Rayo. J; Voisin. L. 2020. Cobre refinado, un buen negocio para Chile.

Empleos directos cercano a 570 personas, e indirectos más de 1,500 personas en encadenamientos productivos⁴².

I+D+i

Una propuesta como la planteada requiere una estrategia que incorpore nuevas tecnologías en el procesamiento de minerales complejos (industria 4.0), recuperación de elementos de valor, uso intensivo de automatización, control de procesos, uso de sensores de nueva generación, adquisición de datos, digitalización e hidrógeno verde. Además de recursos humanos capaces de operar nuevas tecnologías y/o diseñar innovaciones, en estrecha relación con otros equipos técnicos internacionales.

Fortalecimiento de planes de formación técnica vinculados directamente con la industria, asegurando que los planes formativos estén en sintonía con sus desafíos. La formación técnica en procesos mineros debe poner foco en la eficiencia, productividad, seguridad y sustentabilidad de los procesos (economía circular).

Esta actividad debe ser realizada en conjunto con centros e institutos de investigación nacional e internacional. Con esto se fortalece un ecosistema incipiente de apoyo a la innovación, posible de evaluar a través de centros de pilotaje, hub tecnológicos y creación de empresas de base tecnológica.

Agentes involucrados

La inversión proviene de inversionistas privados interesados en tomar posiciones en el país líder del mercado. El Estado debe tener un rol clave, en dar la señal política de prioridad para el país y actuar en concreto para:

- Atraer inversionistas y operadores calificados, de preferencia internacionales.

- Asegurar que los productores de concentrados ofrezcan contratos de largo plazo, a precios de mercado, condición básica para gatillar proyectos de fundiciones independientes (custom smelter).

- Definir las mejores ubicaciones potenciales mediante un trabajo con las comunidades donde se instale la nueva FURE, de manera transparente e informada.

5.5 SUPERACIÓN DE BARRERAS

5.5.1 RELAVES

Barreras tecnológicas

Uno de los mayores desafíos que enfrenta la gestión de los relaves es su gran escala y el volumen creciente que se genera, debido a aumentos de la producción y principalmente por la disminución de las leyes de los minerales extraídos y procesados.

Barreras socioculturales

La transformación de los relaves y su eventual reutilización en obras civiles debe superar la percepción negativa que tiene la ciudadanía, que en muchos casos los considera, erróneamente y sin muchos fundamentos, como residuos peligrosos o incluso tóxicos.

En la minería, y probablemente más en el caso particular de la gestión de relaves, los profesionales a cargo de los procesos muestran una fuerte resistencia al cambio y a la adopción rápida de soluciones innovadoras. Ello se debe, en parte, al largo tiempo que demoran los proyectos mineros en materializarse, junto con la altísima inversión, entre la concepción y su puesta en marcha, y a la dificultad o casi imposibilidad de volver atrás en las soluciones

42.

Lagos, G.; Valenzuela, I.; Valdés, M.; Jara, J.; Salas, J.; Rayo, J.; Voisin, L. 2020. Cobre refinado, un buen negocio para Chile.

técnicas adoptadas en el diseño del proyecto. No hay espacio para la equivocación y ello se traduce en una preferencia por soluciones tecnológicas probadas y a escala industrial. De allí la importancia de desarrollar mecanismos e infraestructura que faciliten el pilotaje y el escalamiento de las tecnologías e innovaciones en desarrollo.

Barreras institucionales y regulatorias

Es relevante y esencial crear nuevas normativas o modificar las existentes, en el plano ambiental y sectorial, que se adapten a los desafíos futuros. En particular, es necesario crear una institucionalidad e instrumentos regulatorios que agilicen el saneamiento y eventual reprocesamiento de los relaves. Dentro de lo mismo, revisar el caso de los planes de cierre que conllevan a entregar garantías financieras.

La demora en la evaluación y aprobación ambiental de proyectos nuevos y de las modificaciones a proyectos existentes puede ser, en algunos casos, un freno a la adopción de mejores soluciones innovadoras y de nuevas tecnologías. El sistema de evaluación ambiental debería generar mecanismos que den mayor flexibilidad para acelerar la implementación de tecnologías que contribuyan a una gestión ambientalmente más responsable de los relaves.

5.5.2 GENERAR NUEVAS FUNDICIONES

La principal limitante proviene de visiones de política que no proyectan el valor de este sector para el desarrollo de la minería, asumiendo que la falta de competitividad es un rasgo estructural, imposible de remontar y que no tiene sentido pretender competir con las fundiciones chinas.

Para superar esta barrera es muy importante mostrar y demostrar a los distintos sectores académicos y políticos que una fundición nueva es muy necesaria

para que la minería pueda incrementar su aporte al país. Y lo más relevante, es posible en términos de rentabilidad.

Las fundiciones en Chile están ligadas a las llamadas zonas de sacrificio y por ende gozan de mala reputación ante la opinión pública. Las metas planteadas requieren de un arduo trabajo multi stakeholder para dar a conocer que es factible desarrollar capacidad de fundición de última generación, ambientalmente amigable y que además agrega valor a la industria minera y al país.

5.6 COORDINACIÓN CAPÍTULO 5

Iván Valenzuela, Osvaldo Urzúa, Heidy Jofre, Carlos Rebolledo, Jacques Wiertz, Víctor Pérez, Juan Carlos Salas, Oscar Benavente, Roberto Parra, María Cecilia Hernández, Grecia Pérez de Arce, Katherine Ferrada, Karla Lorenzo, José Tomás Morel, Juan David Rayo, Eva Tobar, Rodrigo Moya, Brian Townley, Eduardo Campos, Humberto Estay, Andrés Ramírez, Guillermo Olivares, Cristóbal Guirardi.

FINANCIAMIENTO DE PROYECTOS ESTRATÉGICOS E IMPULSO A LA INNOVACIÓN EN MINERÍA VERDE

El propósito de este capítulo es contar con una arquitectura de financiamiento conectada a la política sectorial y al ecosistema de ciencia y tecnología, que favorezca la innovación y las alianzas público-privadas, para que nuestro país logre desarrollar una minería de clase mundial, exportadora de minerales sustentables y de productos y servicios intensivos en conocimiento.

La propuesta reivindica el royalty minero, recuperando su vocación original. Los instrumentos abarcan el proceso de innovación, desde el desarrollo de la ciencia hasta el escalamiento industrial, con orientaciones de mediano y largo plazo; diversidad de herramientas para desafíos de mediana y gran envergadura; y mecanismos variados de financiamiento: fondos, incentivos tributarios, subsidios reembolsables y no reembolsables, entre otros.

6.1 INTRODUCCIÓN

La minería verde es una de las principales oportunidades de nuestro país para movilizar la diversificación y sofisticación productiva, el desarrollo tecnológico y la innovación.

Recientes iniciativas público-privadas han logrado consenso en cuanto al gran potencial del sector minero de ser un catalizador del desarrollo del ecosistema de innovación y emprendimiento en Chile. Estas iniciativas han logrado ciertos avances y se aprecia un interés mayor en la innovación, pero un compromiso real requiere de mayor escala para consolidarse y un marco institucional con consistencia en el tiempo, tanto en los mecanismos de gobernanza como en la asignación de recursos.

La Comisión de Financiamiento de minería verde ha abordado 2 componentes en el ciclo de innovación e inversión:

- Propuestas para el financiamiento de la I+D+i y el capital humano avanzado.
- Propuestas para el financiamiento de proyectos estratégicos de inversión.

El ejercicio realizado en 2020, en torno a la Política Minera 2050, en particular en la Comisión de Innovación y Cadena de Valor, fue una oportunidad de convergencia de visiones para sentar las bases de una nueva estrategia, con un financiamiento adecuado y mecanismos innovadores. La propuesta fue el punto de partida para la Comisión de Financiamiento de Proyectos Estratégicos e Impulso a la Innovación en Minería Verde.

En los desafíos mineros y de energía limpia, pilares de una minería verde, Chile es un reconocido actor a nivel mundial, lo que emprenda y logre tendrá un alto nivel de visibilidad, tanto en inventores, emprendedores, inversores, corporaciones, entre otros agentes que es clave sumar a estos desafíos.

Chile, y en particular su zona centro-norte, presenta condiciones inmejorables para que, a través de una minería

virtuosa, que genera valor de forma sostenible impulsando una transformación productiva que pueda traccionar a todo un ecosistema de innovación regional, nacional y global. Cualquier tecnología que logre un escalamiento industrial competitivo que sea pilotada en Chile, tendrá todos los atributos y condiciones para que pueda ser exportada a todo el mundo.

Nuestro país tiene las reservas de cobre y litio más importantes del mundo, la radiación solar más intensa del planeta y la demanda urgente por mayor sostenibilidad de la actividad extractiva. Estas condiciones generan un laboratorio natural único en el mundo para el pilotaje y escalamiento industrial de tecnologías asociadas a la minería verde.

El desafío es inmenso y también lo es la oportunidad que nos abre nuestra minería. Se requiere del alineamiento de todo un país y sus capacidades detrás de este propósito inspirador de manera que sea viable, convocante y movilizador. Un elemento estructural para perseguir este audaz objetivo es reconocer que el país y su industria minera requerirá de inversiones nacionales e internacionales de miles de millones de dólares para lograrlo. Esfuerzos financieros marginales dejarán al país expuesto a una minería agotada en recursos mineros y habiendo perdido la oportunidad de transformar las regiones donde opera y a todo el país.

Presentamos a continuación el diagnóstico y las propuestas para avanzar en esa dirección.

6.1.1 SITUACIÓN DE CHILE EN I+D+i

Chile ha avanzado en las últimas décadas en conformar la institucionalidad y los mecanismos de apoyo a la investigación, desarrollo e innovación, pero aún exhibe pobres resultados en los principales indicadores del desempeño innovador, muestra una fuerte caída en el esfuerzo de I+D+i y viene perdiendo posiciones a nivel internacional en la última década.

En el *Global Innovation Index*⁴³ 2021, Chile se sitúa en el lugar 53, habiendo estado en el lugar 34 en 2007, y sus resultados más débiles se dan en producción de conocimiento y tecnología, producción creativa y sofisticación de mercado. En el informe

2020, del *World Economic Forum*, se muestra el bajo rendimiento actual de la economía chilena y sus principales debilidades están en “incentivar y ampliar inversiones en investigación, innovación e invención para crear mercados del mañana”, y “facilitar la creación de mercados del mañana en áreas que requieren colaboración público-privada”, categorías en la que nuestro país se encuentra por debajo de Argentina e Indonesia respectivamente.

En relación con el financiamiento público de la innovación, en el año 2005 se instauró el impuesto específico a la actividad minera, conocido también como royalty a la minería, con el objeto de destinarlo a la innovación, de modo que el país pudiera diversificar sus opciones de desarrollo productivo futuro. Ese fue el compromiso explícito cuando se fijó el royalty, que con el tiempo ha ido perdiendo fuerza.

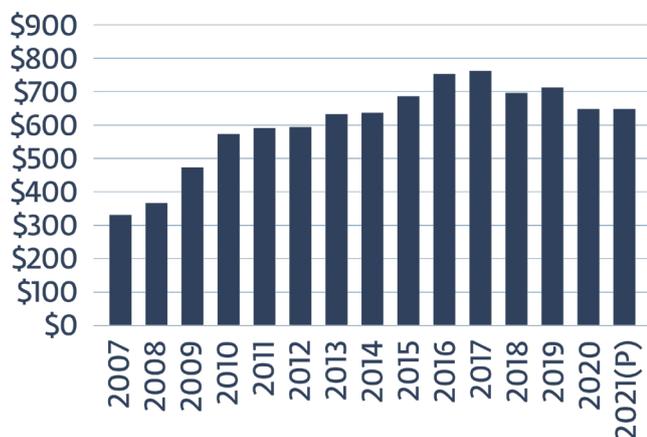
En la última década, del total de la recaudación del royalty, un promedio anual de cerca de US\$ 600 millones, poco más de un tercio se destinó al financiamiento de I+D+i mediante el Fondo de Innovación para la Competitividad, FIC, que aporta recursos a nivel central a través de CORFO y de la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID-ex Conicyt) y a nivel regional (FIC Regional), entre US\$ 200-230 millones anuales. De esta forma, el espíritu original no se ha cumplido a cabalidad, pues gran parte de la recaudación se destina a otros gastos corrientes. Las evaluaciones de resultados e impacto de los programas de I+D+i que han recibido aportes del royalty minero son limitados y no existe un sistema que facilite el monitoreo y aprendizaje oportuno para asegurar un uso eficiente de los recursos. La evaluación del uso de los recursos en su componente regional (FIC regional) muestra importantes deficiencias en el diseño, implementación y evaluación/seguimiento, según la evaluación ex post EPG de DIPRES⁴⁴.

El financiamiento a la I+D+i en el país tuvo una tendencia creciente, aunque modesta, desde la implementación del mecanismo del FIC en 2007 hasta el 2017-2018. Luego ha experimentado una dramática caída. Según muestra el análisis de Balbontín y Zahler⁴⁵ del Gráfico 1, los niveles de gasto público en I+D+i que se verifican en 2021 representan el retroceso de una década. Si bien en la componente

43. Global Innovation Index: Índice creado en 2007 por INSEAD (Escuela Europea de Negocios/Francia) y que hoy se publica en conjunto con la Universidad de Cornell (Estados Unidos).

de ciencia se mantiene más bien estable, las caídas en el período 2018-2021 en innovación empresarial, transferencia tecnológica y emprendimiento son del orden de 43%, 38% y 21%, respectivamente.

PRESUPUESTO PÚBLICO CTI



Métrica	2017	2020	2021(P)
GASTO CTI/PIB	0.26%	0.39%	0.33%
GASTO CTI/GASTO TOTAL	1.36%	1.68%	1.23%

Gráfico 1: Presupuesto público en CTI (en miles de millones de pesos) 2020.

6.1.2 CARACTERÍSTICAS DEL ECOSISTEMA DE INNOVACIÓN EN MINERÍA

A nivel mundial, las compañías mineras tienen uno de los gastos más bajos en I+D+i, pero no sucede lo mismo en el sector en su conjunto, que incluye a las compañías mineras y sus proveedores. Esta dinámica global no se presenta con la misma intensidad en nuestro país. Es relevante

destacar la taxonomía evidenciada por Keith Pavitt⁴⁶ sobre las particularidades de los ecosistemas de innovación de la industria minera a nivel global, que destacan por estar “orientados al proceso”, “dominados por el proveedor” y “con usuarios sensibles al precio”. Estas dos últimas características sobresalen en una industria con ‘proveedores innovadores’ de todo tamaño, y con costos particularmente altos asociados a sus procesos de innovación (principalmente, por la escala de la industria).

El estudio “Investigación, Desarrollo e Innovación en la Minería Chilena” realizado por Cochilco en 2020, que consolida los datos de las encuestas nacionales de I+D y de innovación de la última década, muestra una baja sostenida en el esfuerzo de las compañías mineras, muy especialmente de la estatal Codelco. Esto se evidencia en el Gráfico 2.

EVOLUCIÓN NOMINAL I+D+i

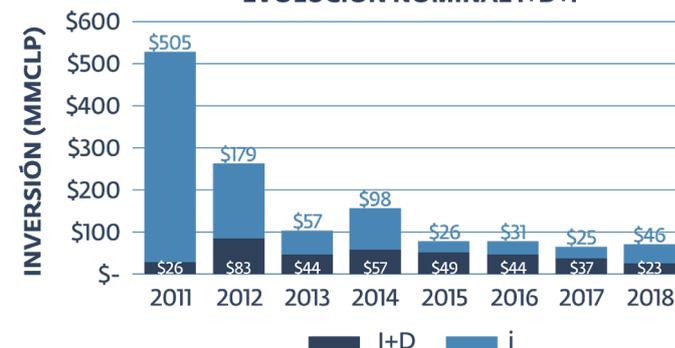


Gráfico 2: Inversión en I+D+i en minería en Chile. Fuente: Elaboración propia con información de COCHILCO. 2020.⁴⁷

A nivel nacional, el sector minería (minas y canteras) se posiciona en lugar 15 de 18 sectores en el indicador de intensidad de gasto en I+D, medido como el gasto con relación al PIB sectorial, con un valor de 0,07% según la Octava Encuesta Nacional sobre gasto y personal en I+D publicada en 2019, con año de referencia 2017. La minería es largamente superada por sectores como la industria manufacturera, el sector agropecuario-silvícola o la industria química, del caucho

44. EPG-DIPRES: Evaluación de Programas Gubernamentales de la Dirección de Presupuesto del Ministerio de Hacienda.

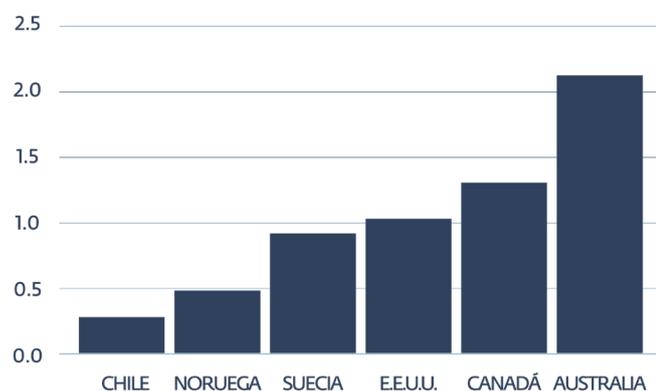
45. R. Balbontín, A. Zahler. 2020. Presupuesto de ciencia, tecnología e innovación: miopía sin tratamiento. Análisis basados en el documento “Ciencia, Tecnología e Innovación en Chile: un análisis presupuestario. CIPER.

47. COCHILCO. 2020. Investigación, desarrollo e innovación en la minería chilena.

y el plástico, que exhiben valores de intensidad sectorial de I+D de 0,32%, 0,36% y 0,72%, respectivamente.

Comparativamente, otros países mineros exhiben cifras muy superiores a las de Chile, según el documento de conclusiones del Production Transformation Policy Review of Chile, realizado por el Centro de Desarrollo de la OCDE en 2018 y que se muestra en la Ilustración 6.

Intensidad de I+D en minería 2015



Número de personas en I+D por 1.000 trabajadores

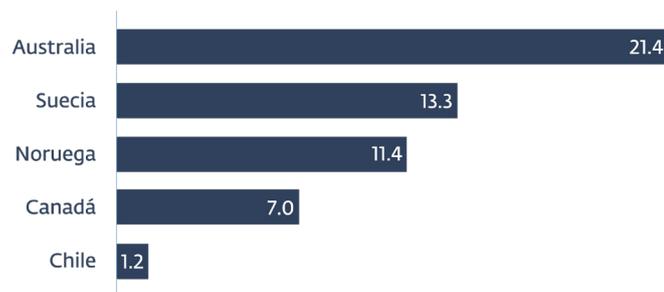


Ilustración 6: Intensidad de I+D y número de personas en I+D en países mineros. OCDE, 2018.

Lamentablemente, el análisis de las encuestas nacionales de I+D+i no permite cuantificar el esfuerzo de los proveedores en Chile, ya que están en otra categoría de clasificación industrial (sesgo que también existe en las estadísticas de los países usados en la comparación). Ello es un desafío para las estadísticas de ciencia, tecnología e innovación del país.

La encuesta realizada por la plataforma de innovación abierta Expande, a un universo de 42 empresas proveedoras en 2014, mostró que la intensidad de inversión en innovación (que incluye actividades de I+D y otras actividades innovativas) se ubica en torno al 12-13%. Esto se ratifica con la encuesta efectuada por Cochilco, donde las empresas proveedoras reportan una intensidad e innovación promedio en torno al 14,2%, aunque con grandes diferencias entre empresas proveedoras grandes (5,8%), medianas (27,1%) y pequeñas (21,1%).

Desde la perspectiva de las patentes, Chile tiene una baja participación a nivel mundial y se observa una merma de vigor de la innovación en minería en el país en la última década, con lo cual ha perdido posicionamiento en la reciente ola de innovación minera mundial en temas como automatización, medio ambiente, procesos metalúrgicos, refinación u otros.

A esto se suma una cultura de baja colaboración y confianza en el país y poco respeto a la propiedad intelectual. Adicionalmente, las empresas mineras nacionales e internacionales con operaciones en Chile tienen pocos incentivos para el desarrollo de innovaciones con la participación de actores del ecosistema de innovación nacional y privilegian los desarrollos en otros entornos más avanzados tecnológicamente.

6.1.3 MINERÍA VERDE: UNA OPORTUNIDAD ÚNICA

La diversificación de las economías, especialmente en países con alta preponderancia de industrias basadas en recursos naturales, no se lleva a cabo a través del desarrollo de sectores productivos completamente

desvinculados con el patrón actual, observándose un caso análogo en la canasta exportadora de dichos países. Tanto la teoría como la evidencia sugieren que los saltos de un sector productivo a otro solo se pueden lograr sobre la base de las capacidades existentes, en lo que se ha denominado “el adyacente posible”⁴⁸. Adicionalmente, la escala del sector a nivel local y el nivel de capacidades productivas y tecnológicas instaladas, son determinantes de las posibilidades de transferencia, absorción, adaptación e innovación tecnológica. El sector minero presenta una de las mejores y más concretas alternativas para impulsar una transformación hacia sistemas productivos más intensivos en conocimiento.

Recientes iniciativas como el Programa Nacional de Innovación en Minería, convertido hoy en la Corporación Alta Ley⁴⁹, logró consensuar una Hoja de Ruta al 2035, con una cartera de proyectos prioritarios que fueron cofinanciados por Corfo y por el Fondo de Inversión Estratégica, FIE, creado por el Ministerio de Economía. Así conformó un portafolio de iniciativas con impacto potencial, que sumó aportes público-privados por sobre los \$54 mil millones, con una paridad promedio entre los aportes públicos y los aportes privados.

Sin embargo, luego de un primer ciclo de proyectos, y de contar con un segundo portafolio definido, no se ha logrado financiar el nuevo portafolio, ni asegurar la continuidad de los primeros proyectos. La Corporación Alta Ley ha sido capaz hasta ahora de sostener el esfuerzo, el relato y el capital social para estos propósitos. Sin embargo, el ecosistema minero no ha tenido el éxito deseado en cuanto a la estabilidad del financiamiento del esfuerzo.

La actualización de la Hoja de Ruta realizada en 2019, con una amplia participación de actores del ecosistema minero, incluyó expresamente un núcleo prioritario de minería verde, donde se planteó la oportunidad para el país y los desafíos y soluciones basadas en I+D+i para los ámbitos de: Sustentabilidad energética, hídrica

y huella de carbono; Trazabilidad e indicadores de sustentabilidad; Reducción de emisiones gaseosas, líquidas y sólidas; Seguridad e higiene ambiental; Economía Circular (Minería Circular).

Dada la relevancia de este núcleo, en abril de 2021 la Corporación Alta Ley publicó una profundización de este en un documento denominado “Minería Verde, oportunidades y desafíos”, que ahonda en los 4 ejes más relevantes de este esfuerzo -y resume iniciativas asociadas: Sustitución de combustibles fósiles y eficiencia y Transición energética; Trazabilidad y digitalización; Minería circular, y Gestión y eficiencia del recurso hídrico.

En la misma línea, durante 2021 la Corporación Alta Ley, desarrolló el *Roadmap* Tecnológico del Litio en Chile, que contó con la participación de los principales actores del ecosistema, entre compañías mineras, instituciones de gobierno, universidades, centros de investigación, proveedores tecnológicos, y representantes de industrias relacionadas, tales como energía y electromovilidad. Este documento definió una visión consensuada de la estrategia a seguir para desarrollar nuevos proyectos tecnológicos colaborativos de alto impacto. Se priorizaron iniciativas en 4 ejes que corresponden a: Tecnologías de producción eficientes y sostenibles; Trazabilidad y Monitoreo; Materiales Avanzados y, por último, Demanda desde otras industrias y economía circular, los cuales buscan abordar las brechas más relevantes asociadas a la sustentabilidad, productividad, encadenamientos productivos, y desarrollo de capacidades locales.

En el ejercicio sostenido en 2020 sobre la Política Nacional Minera 2050, las comisiones de “Minería Verde” y de “Cadena de Valor e Innovación” reforzaron esos planteamientos y el sentido de urgencia de avanzar en la implementación y en la creación de marcos institucionales que den sustento, financiamiento y consistencia de largo plazo a la visión de futuro construida.

48.

Hausmann, Hidalgo, y Barabási. 2007; O Trejo et al. 2014; Anderson et al. 2015.

49.

Corporación Alta Ley, persona jurídica de carácter privado, independiente, con un endowment que le permite financiar su operación y mantener independencia, neutralidad y consistencia de largo plazo y cuenta con una gobernanza público-privada en la que participa el Ministerio de Minería.

6.2 PROPUESTAS PARA FORTALECER EL FINANCIAMIENTO EN EL CICLO DE INNOVACIÓN Y EL CAPITAL HUMANO EN EL ECOSISTEMA MINERO

6.2.1 PROMOVER EL USO DEL IMPUESTO ESPECÍFICO A LA MINERÍA DE FORMA MAYORITARIA A I+D+i

Se propone volver al espíritu original del royalty minero, orientando mayoritariamente los recursos a políticas de investigación e innovación con foco en grandes desafíos u orientadas por misión.

Considerando la recaudación promedio de la última década y las proyecciones de precio del cobre, se propone dedicar un promedio de US\$ 600 millones al año como recursos frescos, de modo que sean recursos efectivos que entran al sistema. De estos, se propone que una proporción mayoritaria se oriente a sectores no mineros, y una proporción menor a la I+D+i asociada a temas prioritarios del ecosistema minero, como se explica a continuación.

Se trata de inyectar nuevos recursos a aquellas áreas estratégicas para el país, donde se requiere sostener un esfuerzo permanente de I+D+i y de formación de capital humano de largo plazo, de modo de lograr una masa crítica y acumulación de conocimiento y capacidades para tener un verdadero impacto y transformaciones profundas.

Esta propuesta se alinea con las recomendaciones de la Estrategia Nacional de Innovación 2018, que coordinó el Consejo Nacional de Innovación para el Desarrollo, CNID, que incluyeron incrementar y diversificar las fuentes de financiamiento, movilizando e incentivando una mayor inversión del sector privado, junto a un mayor aprovechamiento de los recursos

públicos, a la vez que concentrar los esfuerzos en grandes retos nacionales que permitieran dar masa crítica y proyección a los esfuerzos de innovación.

Así también, es consistente con la recientemente publicada Política Nacional de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación⁵⁰, la primera elaborada en el marco de la nueva institucionalidad del sector, que plantea el camino para el fortalecimiento del ecosistema nacional.

6.2.2 CREACIÓN DE UN FONDO DE INNOVACIÓN DEL ECOSISTEMA MINERO

Todos los esfuerzos de apoyo a la innovación y desarrollo del ecosistema productivo y tecnológico deben estar asociados a programas, proyectos o esfuerzos específicos que definan con claridad su contribución al desarrollo de las misiones y que estén acompañados de sistemas robustos de monitoreo, evaluación y actualización de los esfuerzos para garantizar una adecuada asignación y uso de los recursos.

Se propone crear un mecanismo de asignación de recursos para realizar I+D+i en torno a desafíos colectivos del sector minero, de validación industrial de tecnologías para la minería y de formación e inserción de capital humano. El Fondo sería administrado por una gobernanza sectorial establecida para dicho fin, y operaría con estándares de transparencia y cumplimiento (*compliance*) internacionales. El Fondo de Innovación del Ecosistema Minero estaría conformado por una proporción de la recaudación del impuesto específico, que signifique un aporte gradual que totalice al menos US\$ 1.000 millones en 10 años⁵¹.

El Fondo podrá asignar financiamiento a iniciativas de corto plazo (a 1-2 años) y mediano plazo (a 3-5 años), pudiendo establecer condiciones para renovar el financiamiento, sujeto a evaluación intermedia.

50. Ministerio de Ciencia. 2020. https://www.minciencia.gob.cl/politicaactci/documentos/Politica-Nacional-CT-Ci_Chile-2020.pdf

51. Esta propuesta tiene como referencia el SIF – Net Zero Accelerator Canadá, un fondo de \$ 3 mil millones durante 5 años para acelerar rápidamente los proyectos de descarbonización con grandes emisores, ampliar la tecnología limpia y acelerar la transformación industrial de Canadá en todos los sectores.

Para asegurar un adecuado balance del portafolio de iniciativas, deberá establecer lineamientos respecto del máximo nivel de arrastre o compromiso a largo plazo que puede comprometer cada año, de modo de garantizar disponibilidad de recursos en los años venideros.

El nuevo mecanismo deberá poner especial atención en fomentar la colaboración. Las dificultades para avanzar en esfuerzos colaborativos son las asimetrías de información y la desconfianza, de ahí los altos costos de transacción que tienen estas iniciativas. Es labor de esta gobernanza facilitar la colaboración para constituir centros colaborativos o modelos consorciados. Al mismo tiempo, estos centros colaborativos o consorcios que ejecutarán los programas de innovación deberán propender a que sus gobernanzas sean público-privadas y contar con hojas de ruta claras para la mantención y creación de capacidades en la frontera tecnológica, alineados con las demandas del sector.

El Fondo debería crearse con una proporción del impuesto específico a la minería y tendría los siguientes tres componentes o subfondos

6.2.3 FONDO PARA BIENES PÚBLICOS Y BIENES CLUB, CENTROS TECNOLÓGICOS E INVESTIGACIÓN TECNOLÓGICA PRECOMPETITIVA ASOCIATIVA PARA DESAFÍOS COLECTIVOS DEL SECTOR

Esta propuesta es consistente con la falta de incentivos para desarrollar conocimiento beneficioso para el sector minero en su conjunto, pero que ninguna empresa está dispuesta a financiar individualmente, porque las compañías mineras prefieren apoyar la innovación que se desarrolla a nivel internacional, que los esfuerzos que se hacen en el país. Ello, ya que

existen problemas asociados a la apropiación completa de los beneficios para quienes individualmente desarrollan este nuevo conocimiento o porque no existen incentivos para impulsar innovaciones en sistemas que no están maduros. La literatura sugiere, en consecuencia, la obligación en el financiamiento por todos los potenciales beneficiarios en base a un mecanismo de compromiso regulado para evitar comportamientos oportunistas de algunos actores (Romer, 1993).

En el sector minero, al igual que en otras industrias basadas en recursos naturales, existe una gran necesidad de conocimiento para sustentar la toma de decisiones públicas y privadas que propendan al bien común. Pero los mecanismos disponibles para priorizar su ejecución y financiarlos son muy limitados a nivel de ministerios y agencias de investigación, desarrollo e innovación.

A su vez, el apoyo a la oferta de capacidades tecnológicas desde el mundo de las entidades del conocimiento no ha tenido una visión estratégica y ha habido inconsistencias dinámicas o cambios de estrategia de los distintos gobiernos, que han impedido la proyección de estas capacidades en el tiempo, como los casos de INTEC, el CIMM o las filiales tecnológicas de Codelco.

Propuesta

Se propone crear un Fondo para promover iniciativas asociativas o consorciadas entre empresas mineras, proveedores, centros de investigación y universidades, para financiar programas cuyos resultados queden ampliamente disponibles para su uso por todo el sector o el propio Estado en su rol normativo, o que provean capacidades tecnológicas estables y aborden las fases de investigación aplicada y desarrollo tecnológico en áreas estratégicas para el sector.

En otras palabras, estos mecanismos no conducen a un producto o tecnología en específico, pero crean

condiciones para que, a partir del conocimiento generado, el ecosistema y sus actores se muevan hacia la generación de nuevas soluciones.

Entre los mecanismos o programas a incluir en este sub fondo se pueden mencionar:

- Apoyar el desarrollo de **Bienes Públicos**, aquellos que dicen relación con información para apoyar los procesos de toma de decisiones, alinear esfuerzos, proveer direccionalidad (*signaling*) y desarrollo de políticas públicas de interés para todo el país. Por ejemplo, el estudio de la localización y tecnologías de depósitos de relaves con mínimo impacto ambiental y social, estudios para definir una estrategia nacional de procesamiento de concentrados de cobre con baja emisión; estudios preliminares para promover minería polimetálica; o el estudio de los fundamentos técnicos y económicos de una nueva regulación, entre otros.

El seguimiento, monitoreo y evaluación del portafolio de iniciativas priorizadas colectivamente en el marco de las hojas de ruta, el impacto de estas en los ecosistemas y su consecuente evolución, son una acción clave para el aprendizaje y retroalimentación de todo el proceso, y deben ser considerados como bienes públicos fundamentales para el diseño y programación eficaz y eficiente de políticas, iniciativas y uso de recursos público-privados.

- Financiar el desarrollo de **Bienes Club**, aquellos de interés colectivo del sector que tienen costo compartido, como la generación de informes de prospectiva tecnológica y desarrollo detallado de Hojas de Rutas tecnológicas para la minería; planes de desarrollo de la fuerza laboral, incluyendo capital humano avanzado y perfiles de competencias certificables;

sistemas de monitoreo en línea de variables hídricas, ambientales y del funcionamiento de los ecosistemas por cuenca; creación de observatorios de temas ecosistémicos del sector, ambientales o laborales, entre otros.

- Apoyar el financiamiento de largo plazo de **centros de investigación científica y desarrollo**, para abordar las tecnologías de la minería verde, incluyendo la creación de infraestructura relevante para investigación precompetitiva y mecanismos para la formación e inserción de capital humano avanzado en áreas estratégicas.

- Apoyar el financiamiento de **Centros Tecnológicos**, principalmente en regiones mineras, que generen conocimiento enfocado en innovación y desarrollo tecnológico para la minería de cobre, litio y producción polimetálica. Este propósito busca lograr sectores 'Mineros y Energéticos Verdes' alineados con el cuidado de su entorno, el desarrollo de sus comunidades y el país. También debería considerar el financiamiento de base para la mantención y desarrollo de capacidades a largo plazo de los **Centros de Pilotaje** para la Minería, que se encuentran en su primera etapa y que son cofinanciados por Corfo. Estos apoyan a los proveedores y *start-ups* del ecosistema minero para la validación de sus soluciones tecnológicas, entre ellas de minería verde, hidrógeno verde, extracción y producción de litio de baja huella ambiental y otros.

- Apoyar **Programas de Extensionismo Tecnológico** que permitan, especialmente a la mediana y pequeña minería, así como a los proveedores, adoptar tecnologías disponibles en el mercado, implementar prácticas sostenibles y capacitar a sus profesionales y

técnicos, a fin de transformar su oferta de valor.

- Financiar **Programas de Investigación**

Asociativa Precompetitiva: Se trata de las etapas de investigación aplicada y desarrollo tecnológico dirigidos a la producción de nuevos materiales, productos o dispositivos y al establecimiento de nuevos procesos, sistemas o servicios, incluyendo la fase de construcción de prototipos, plantas piloto o unidades demostrativas. Ejemplos de este tipo de programa son: el desarrollo de nuevos sistemas de visión espectral para la caracterización mineralógica y química de minerales para una minería más precisa y con menos residuos; nuevos procesos minero-metalúrgicos de baja emisión o sin residuos; nuevas tecnologías no evaporíticas de extracción de litio; nuevas tecnologías de conminución sin uso de agua; desarrollo tecnológico que requiere la minería secundaria para el tratamiento efectivo y rentable de residuos mineros con enfoque de economía circular (relaves, ripios, desmontes, escorias, polvos, etc.) y tecnologías innovadoras que permitan producir compuestos y materiales basados en litio acortando los procesos productivos, entre otros. Estos programas son asociativos, realizados entre empresas proveedoras de la minería, universidades, centros de investigación y empresas mineras.

- Apoyar un **programa de internacionalización y promoción del sector proveedores**

de la minería con activos productivos en Chile y con foco en proveedores de base tecnológica o intensivos en conocimiento que desarrollen productos o servicios asociados a minería verde. Así se busca contribuir al desarrollo exportador del país y su diversificación, en el marco de la política de inserción internacional del país y de acuerdo con las normas internacionales.

6.2.4 FONDO DE SUBSIDIO CONTINGENTE A LA INNOVACIÓN PARA VALIDACIÓN INDUSTRIAL DE TECNOLOGÍAS PARA LA MINERÍA

Entre los principales mecanismos para el financiamiento de la I+D+i se cuentan los subsidios no reembolsables competitivos, los anticipos reembolsables y los incentivos tributarios. Estos son adicionales a otros mecanismos como crédito o financiamiento.

En Estados Unidos, por ejemplo, se usan preferentemente los subsidios no reembolsables competitivos. En el caso de la I+D realizada con fondos públicos en Universidades e Institutos Públicos se encomendó al *Federal Labs Consortium of Technology Transfer* ejecutar los estudios de impacto económico, asociados preferentemente a la incorporación de tecnología en las empresas, la generación de nuevas empresas de base tecnológica, la creación de nuevos productos de alcance global y la creación de empleo.

En el caso de Israel, un ecosistema de ciencia, tecnología e innovación muy maduro y sofisticado, la I+D se realiza con fondos públicos en universidades, centros de investigación y consorcios universidad-empresa (Magnet y Magnetron) liberados de la restitución de los fondos. Cuando se trata de innovación empresarial y emprendimiento de base tecnológica, existe un mecanismo de reembolso que opera mediante un esquema de royalty hasta completar el 100% del subsidio más intereses. Los royalties son variables, desde un 3% de las ventas para empresas pequeñas o nuevas, con tope de 5% para grandes empresas (con algunas excepciones), que se extingue una vez completado el monto del fondo público y sus respectivos intereses.

En países europeos existen preferentemente mecanismos de subsidios competitivos, como el caso de Reino Unido y Alemania, y en los últimos años han

emergido mecanismos de anticipos reembolsables en España, Francia e Italia, que aplican preferentemente a nivel de financiamientos nacionales. A nivel comunitario, la Comisión Europea ha estado analizando los mecanismos de financiamiento de la I+D+i, con miras a definir los lineamientos del 9° Programa Marco de Ciencia y Tecnología (FP9 de 2021-2026), donde el principal seguirá siendo el de subsidios competitivos, pero se incluirán también anticipos reembolsables.

Los mecanismos de apoyo a la innovación empresarial en Chile se concentran fundamentalmente en Corfo, a través del Comité Innova Chile. Los mecanismos de subsidio a la I+D+i han venido decreciendo y los montos disponibles no sirven para el escalamiento de tecnologías para la minería, donde el desarrollo de prototipos funcionales o pruebas piloto son de alto costo. Por otro lado, el mecanismo de crédito tributario a la I+D, si bien es un instrumento atractivo para empresas consolidadas, compañías mineras o grandes proveedores, no es adecuado para pequeños y medianos proveedores y para *startups* que desarrollan nuevas soluciones basadas en tecnología.

Propuesta

Crear un mecanismo destinado a la innovación apropiable con foco en minería verde, que permita cofinanciar y compartir el riesgo tecnológico de proyectos de mayor madurez y envergadura, en etapas críticas de validación tecnológica que normalmente representan un alto costo y aún están inmaduras para conectar con Fondos de Inversión o de Capital de Riesgo. Ver apunte metodológico sobre los niveles de madurez tecnológica o TRL en Anexo 3.

- Un Fondo de **subsidio contingente** para la validación industrial de tecnologías mineras estaría orientado a validar desarrollos tecnológicos en el rango de TRL 5 a 8, tanto para pruebas a escala piloto preindustrial (TRL 5-6)

como para su validación industrial en entornos mineros (TRL 7-8). Podrán acceder empresas proveedoras de la minería, tecnológicas y *startups*, así como universidades o centros de I+D nacionales. También las empresas mineras para escalamientos que se desarrollen en el país, tendiendo a la colaboración tecnológica con el ecosistema minero y a maximizar el aporte de valor local.

- El Fondo funcionaría como un mecanismo de **subsidio contingente o anticipo reembolsable**. Es decir, aquellos proyectos que no logren éxito en el escalamiento de la tecnología recibirán el aporte como un subsidio. Aquellos que resulten exitosos y sean llevados al mercado, reintegrarán los fondos más intereses en un período, sea en cuotas preestablecidas o mediante un porcentaje acordado sobre los ingresos futuros.

- Los recursos reembolsados por los proyectos exitosos serían reinvertidos en el Fondo para apoyar nuevos proyectos, tal como se hace en varios países de Europa, en Israel o Corea. De esta forma, las tecnologías exitosas contribuirían a la productividad y sustentabilidad de la minería y al mismo tiempo permitirían crear un círculo virtuoso de recursos para innovación.

6.2.5 FONDO DE FORMACIÓN E INSERCIÓN DE CAPITAL HUMANO AVANZADO EN EL ECOSISTEMA MINERO

El capital humano avanzado (CHA) es decisivo para la competitividad, el crecimiento y el desarrollo económico, social y ambiental, aportando desde la industria, el Estado, la academia y la sociedad civil. Profesionales y trabajadores mejor preparados son necesarios para operar y mantener maquinarias y equipos sofisticados. La velocidad de difusión y adopción de las nuevas tecnologías depende de

la cantidad de profesionales y técnicos locales.

Contar con una mayor dotación de capital humano avanzado acelera el proceso de “catch up” o puesta al día en I+D+i, y atrae flujos de inversión extranjera, influyendo por esta otra vía sobre el crecimiento económico.

Aumentar y mejorar la vinculación temprana de estudiantes de educación superior de nivel técnico, pregrado y postgrado con la industria minera (gran minería, mediana y pequeña, proveedores) permite mejorar las competencias esperadas de los procesos de formación. La realización de tesis de pregrado y postgrado en la industria aumenta la probabilidad de empleabilidad del estudiante y es un mecanismo efectivo para que las empresas puedan desarrollar y adquirir conocimiento tecnológico. Por su parte, los emprendimientos de base científica-tecnológica son un vehículo atractivo para la inserción de doctores y en general personal de I+D, que tiene interés en desarrollar una trayectoria de emprendimiento y crecimiento profesional en forma acelerada.

En Chile existe una muy baja participación de doctores en posiciones ejecutivas y directivas en la industria y en el Estado, en comparación con países desarrollados. Además, la información disponible sobre trayectorias profesionales de graduados en la industria y en el Estado es escasa. Uno de los pocos estudios que analizan el tema es “Revolución Tecnológica 4.0 y Capital Humano”⁵² de la iniciativa “Beauchef Minería” de la Universidad de Chile. En él se indica que países como Alemania y Corea del Sur tienen entre un 30% y 40% de doctores en puestos de gerencia y directorios en empresas grandes, mientras que en Chile es 0% para los directorios y solo un 3% para las gerencias. Se indica además que “las empresas cuyos CEO son doctores tienen un 24% mayor de patentamiento y un nivel de citas un 46% mayor que las empresas cuyos CEOs no son doctores (He 2014)”. Algunos países desarrollados como Estados Unidos, Canadá y Australia tienen entre

10 y 20 veces el número relativo de doctores que existe en Chile.

En temas específicos como fundición y refinación, el informe de la Comisión FURE solicitado por el Ministerio de Minería en 2017 estableció que los investigadores con grado de doctor activos en pirometalurgia no superan las 15 personas, existiendo en Chile 7 fundiciones con una capacidad de procesamiento cercano a 2 millones de toneladas.

Se plantea como hipótesis que el aumento de la inversión y el impacto de los procesos y desarrollo tecnológico en la minería chilena depende y está limitado, entre otros factores, por la inversión e inserción de capital humano avanzado en empresas mineras, proveedores de la minería, centros tecnológicos y en entidades del Estado que formulen e implementen políticas públicas relacionadas con el sector.

Propuesta

Aumentar la participación y relevancia de profesionales con postgrado, especialmente con grado de doctor en la minería chilena, requiere de medidas que van más allá de aumentar el financiamiento para becas de postgrado. Desde una mirada sistémica, las propuestas para el cierre de brechas deberían abordar el ajuste de la oferta de formación, un cambio en la demanda de capital humano avanzado desde la industria, resolver asimetrías de información, direccionar en forma articulada subsidios e incentivos del Estado y la industria, mejorar la coordinación y articulación con otras iniciativas de I+D+i y reconocer las barreras que impone la organización industrial y la cultura del sector.

Una primera propuesta de recomendaciones, con foco en minería verde, son:

- Que los programas de doctorado puedan establecer o fortalecer una relación fluida con la industria. Promover programas flexibles que, junto con asegurar competencias para generar

52.
Meller y Salinas.
2019.

nuevo conocimiento científico-tecnológico a través de la investigación, permitan a los estudiantes participar tempranamente en proyectos de investigación aplicada y estar en contacto con profesionales de la minería. Esta orientación se considera un mejor camino que el desarrollo de modelos “profesionalizantes”, más apropiados para programas de magíster y que generan el riesgo de desvirtuar la esencia de un programa de doctorado. Un esquema que favorece la vinculación temprana es la colaboración estrecha entre programas de doctorado y centros de investigación, que tengan una trayectoria de fuertes vínculos con la industria.

- La flexibilidad curricular en la formación de doctores debe entregar opciones a aquellos estudiantes interesados en desarrollar habilidades de emprendimiento científico tecnológico, innovación y de gestión tecnológica, y para quienes opten por trayectorias profesionales orientadas hacia la industria o las políticas públicas. Adicionalmente, se puede promover que estudiantes de doctorado se relacionen con jóvenes emprendedores, para que juntos puedan crear *spin-offs/start-ups* tecnológicos; los estudiantes de doctorado aportan con sus conocimientos técnicos y los emprendedores con su pasión por el emprendimiento, generando la complementariedad necesaria para la creación de nuevas empresas de base tecnológica.

- Una mejor vinculación con la industria requiere disponer de una masa crítica de alumnos en cada programa. Se sugiere realizar una revisión actualizada de la matrícula y progresión de los alumnos de doctorado y de sus líneas de investigación para los programas existentes en Chile, con el fin de promover mecanismos para aumentar su número en cada programa, a través

de iniciativas conjuntas entre universidades y líneas de investigación patrocinadas para la industria.

- Se valora la continuidad de los programas Ingeniería 2030 y la reciente creación de Ciencia 2030. Estos han permitido el desarrollo de consorcios entre Facultades de Ingeniería y Ciencias de diversas universidades, incorporando en los programas de formación el desarrollo de habilidades de innovación y emprendimiento; el aumento de masa crítica de investigadores, y el desarrollo de programas de postgrado orientados a la industria. Se recomienda mantener y profundizar esta línea de trabajo inyectando recursos suficientes para asegurar estabilidad en su financiamiento y avanzar hacia una etapa de mayor vinculación con la industria.

- Con la creación de Becas Chile y el aumento de becas para programas nacionales la matrícula de estudiantes en programas de doctorado aumentó en forma significativa. Sin embargo, la participación de estudiantes en áreas de ingeniería y tecnología sigue siendo baja respecto de las áreas de ciencias sociales y humanidades. Se recomienda hacer llamados focalizados para becas orientadas a ámbitos del conocimiento consensuados con la industria y de impacto en los proyectos de inversión, ampliación y cierre que materializarán en los próximos 10 años. Entre ellas destacan: automatización, robótica, telecomunicaciones, ciencia de datos, ciencias de los materiales, energías renovables y recursos hídricos.

- La focalización de la formación desde la oferta debe ir acompañada con señales y acciones complementarias desde la demanda. Iniciativas internacionales como Xprize⁵³ o la reciente creación del instrumento de retos de innovación de interés pública (ANID) y de interés productivo

53.
XPRIZE. <https://www.xprize.org/>

(CORFO) con esquemas de innovación abierta, permitirían abordar brechas en bienes públicos y bienes club para la minería. Ello también requiere de fuertes alianzas público-privadas, como la Corporación Alta Ley, que involucren a los ministerios mandantes (Minería, Ciencia, Medio Ambiente, Educación), gobiernos regionales, grandes empresas mineras (Consejo Minero) y asociaciones gremiales que representen al ecosistema de CTCl⁵⁴ y proveedores. Los premios asociados a estas iniciativas deben considerar el financiamiento de becas para tesis de doctores jóvenes y opciones de contratación futura aseguradas, para los mejores equipos o parte de ellos.

- Los proyectos de investigación aplicada, innovación y emprendimiento de base científico-tecnológica han mostrado ser excelentes vehículos para la inserción de capital humano avanzado en temas de interés para la industria. El requisito que se implementó en los proyectos FONDEF, de incorporar doctores jóvenes a los equipos de investigación, es una medida que se recomienda ampliar a otros instrumentos de agencias como CORFO y ANID.

- Respecto a las asimetrías de información, se recomienda diseñar e implementar una iniciativa entre la academia y la industria para facilitar el acceso a la realización de tesis de doctorado en la industria y para la inserción de doctores jóvenes en empresas mineras y proveedores de la minería. Los esfuerzos individuales realizados por universidades y empresas no son suficientes para generar los vínculos necesarios y un efecto de "bola de nieve" que aumente la probabilidad de inserción y una retroalimentación hacia los *stakeholders*.

- El bajo atractivo relativo de la industria minera para talentos jóvenes con postgrado

en investigación también se relaciona con el prejuicio de ser una industria de baja complejidad tecnológica, por estar basada en recursos naturales no renovables y ser "extractivista". Este prejuicio puede ser atenuado con una acción decidida de la industria acompañada de los centros de investigación, para generar una mayor visibilidad y diálogo en torno a los desafíos de innovación y desarrollo tecnológico. Conceptos como minería verde, minería 4.0, minería "quirúrgica", minería cero emisiones y otros de reciente creación apelan a crear una imagen de industria intensiva en conocimiento que requiere enfoques transdisciplinarios para abordar sus desafíos. Se requiere que la industria invierta recursos para lograr un cambio de percepción en los jóvenes con talento y orientación a la ciencia y tecnología.

- El valor para las empresas mineras de disponer de doctores en áreas que no sean de I+D es relativamente bajo respecto de otras industrias intensivas en conocimiento, como la farmacéutica. En países desarrollados existe una significativa mayor participación de profesionales con grado de doctor en posiciones ejecutivas y directivas. Se requiere de más información respecto de la trayectoria profesional de los doctores que trabajan en el sector privado y público en Chile para comprender cómo aumentar su participación en posiciones ejecutivas.

- Lo anterior es clave para generar una mejor valoración de las competencias de los doctores en la "gestión del negocio". La evidencia internacional muestra que profesionales con grado de doctor permiten a las empresas adquirir conocimiento crítico para innovar en forma más rápida, y construir relaciones de colaboración con proveedores de alta tecnología que requieren contrapartes que comprendan las

54.

CTCl: Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación.

bases y riesgos científicos-tecnológicos de sus innovaciones.

- Se recomienda revisar, junto con la industria minera, los instrumentos y el financiamiento para la inserción de doctores en el sector productivo y tesis de doctorado en la industria que gestiona ANID. Históricamente, estos instrumentos han tenido una muy baja demanda (10-12 proyectos por año). Esta revisión podría conducir a procesos de inserción diseñados, para trayectorias hacia posiciones de gestión y liderazgo tecnológico, y no necesariamente hacia proyectos de investigación e innovación que, normalmente son de corto plazo.

6.2.6 APALANCAMIENTO DE CAPITAL PRIVADO PARA LA INVERSIÓN EN I+D+i EN MINERÍA VERDE

Chile es el país productor de cobre más importante del mundo, además de contar con un número significativo de otros minerales para su extracción como lo son el molibdeno, litio, cobalto, zinc, oro, plata, paladio, platino, renio, hierro, entre otros, que dan cuenta de su riqueza geológica. Sin embargo, el mercado de capitales en nuestro país no cuenta con una amplia gama de instrumentos para que inversionistas, fundamentalmente institucionales por su envergadura, puedan invertir local y profundamente en minería, ni tampoco en tecnologías asociadas a la cadena de valor y suministro de una minería verde.

Entre los argumentos esgrimidos, se reconoce que el mercado local es acotado en relación con los importantes volúmenes de inversión que requieren los grandes proyectos mineros. Otro argumento es que el ecosistema minero de innovación asociado a proveedores tecnológicos locales es limitado y poco sofisticado. Sin embargo, esta tradicional mirada

a las necesidades de inversión de la minería chilena no considera las importantes oportunidades que existen en el escalamiento industrial de tecnologías para recuperar y potenciar el dinamismo que requiere la industria nacional en términos de modernización y tecnologización, y que le permita operar sosteniblemente en todas las escalas (pequeña, mediana y gran minería).

Alianzas público-privadas, reformas al mercado de capitales, destrabar limitaciones institucionales, eliminar desincentivos administrativos, generar incentivos tributarios y articular al ecosistema de innovación minero tras el propósito de convertir a Chile en una plaza importante para invertir en minería verde resultan claves. Una alianza al interior de la industria, complementada por acciones público-privadas, involucrando a actores nacionales e internacionales, es fundamental para alinear y concretar estos propósitos para que nuestro país tenga una minería de clase mundial, exportadora de minerales sustentables y de productos y servicios intensivos en conocimiento.

Las oportunidades de inversión asociadas a estos desafíos son innumerables. Impulsos en información geológica; apertura de propiedad minera; vínculos entre la prospección minera y explotación a pequeña escala altamente tecnologizada; desarrollo en todo su potencial de la minería polimetálica; aprovechamiento y valorización de pasivos y residuos mineros; desarrollo de una industria local de productos y servicios tecnológicos de alcance mundial; potenciamiento de la digitalización y uso de sensores (sensorización) en los procesos mineros; desarrollo del hidrógeno y amoníaco verde; disponibilidad de recursos hídricos; almacenamiento energético; electrificación de la movilidad minera; desarrollo de una industria para la generación de materiales avanzados a partir de litio, que respondan a las necesidades futuras del mercado, entre muchos otros focos, figuran como oportunidades para levantar una importante cartera de oportunidades de inversión de este sistema traccionado por una minería virtuosa.

El vínculo presentado debe, además, apalancarse con acciones en los ámbitos de las políticas públicas y corporativas, que permitan disponer de importantes recursos financieros para cumplir con los propósitos presentados.

Propuestas

- **Aumentar la intensidad de I+D en las empresas mineras:** La minería nacional tiene una intensidad sectorial en I+D de un 0,07%, la más baja de los países mineros y una de las más bajas entre todos los sectores productivos a nivel nacional.

Se propone un aumento sostenido de la inversión para llegar al año 2030 al menos al 0,5%, de modo de estar entre los 5 primeros sectores a nivel nacional y moviéndose hacia el promedio de la intensidad sectorial de los países mineros al 2050.

Una proporción importante de esta inversión debería ir a minería verde, aunque otros ámbitos como digitalización e industria 4.0 o nuevos procesos minero-metalúrgicos también deberían ser focos de atención de este esfuerzo, especialmente de tipo colaborativa con proveedores y centros del conocimiento. Adicionalmente, se requiere una mayor coordinación entre las empresas mineras y proveedores, debido al nivel de externalización de los esfuerzos en innovación hacia proveedores, para que estos últimos puedan implementar sus innovaciones en las operaciones.

- **Incentivos tributarios:** Mejorar, ampliar y potenciar el uso de incentivos tributarios a la I+D (Ley N° 20.241 y LeyN°20,570), instrumentos o programas públicos nacionales o internacionales, cuidando la

complementariedad y evitando la duplicidad de aportes, objetivos o líneas de investigación con otros fondos públicos en curso o ya realizados. En particular, se proponen algunas modificaciones que incluirían un cambio legal, tales como:

- Ampliar el tope anual de crédito tributario de 15.000 UTM ya que, para los desafíos de la gran minería, los montos topes actuales son muy bajos. Etapas de desarrollo o pilotajes a partir de TRL 5 hacia arriba requieren, por lo general, niveles de inversión en actividades de desarrollo para un solo proyecto.
- En un contexto de caída del esfuerzo de I+D en Chile, proponemos aumentar el límite actual al crédito tributario a la inversión en I+D. Y, en el caso de contratos de I+D con entidades externas a las empresas, no establecer un límite (la ley vigente considera la certificación de centros de investigación de universidades, institutos de investigación o empresas de base tecnológica establecidas y con capacidades en Chile). Este cambio debe ser transversal; sin embargo, en el caso de la minería, es aún más pertinente en el contexto de la discusión de nuevas regalías, para generar incentivos a la realización de I+D.

Se propone tomar o seguir ejemplos de otros países cuyas legislaciones son más flexibles y no incorporan topes de beneficio.

- Permitir certificar portafolios de proyectos. Por lo general, las compañías mineras gestionan carteras

de iniciativas para mejorar sus procesos y desempeños. Se propone que estas empresas puedan certificar portafolios de proyectos de I+D, cumpliendo ciertos estándares y sistemas de gestión, que serán debidamente acreditados o certificados por entidades o agencias independientes neutrales.

⦿ Permitir certificar gastos de gestión de portafolios de I+D, para propiciar y facilitar procesos de gestión de la I+D de las compañías mineras, a partir de desarrollos internos o generados de manera abierta con el ecosistema de innovación local y global. Se propone incorporar los gastos necesarios para gestionar los sistemas de Innovación como gastos aceptados y que sean sujetos de crédito tributario.

⦿ Incluir entidades o agencias externas acreditadas que certifiquen el uso de la Ley, con el propósito de generar capacidad con mayor flexibilidad y capacidad de gestionar oportunamente las solicitudes de crédito. Se propone establecer la existencia de entidades certificadoras privadas de la Ley de I+D.

• **Corporate Venture Capital o inversión en Fondos de Inversión por parte de empresas mineras**⁵⁵: Promover la inversión de las compañías mineras en Fondos de Capital de Riesgo, creando sus propios fondos (*Corporate Venture Capital*) o siendo aportantes a Fondos administrados por entidades especializadas en Fondos de Inversión. Estos podrían ser co-invertidos por CORFO y otros inversionistas nacionales e internacionales, con una proporción relevante enfocada en el ecosistema minero local, especialmente en proveedores tecnológicos y *startups* que

desarrollan tecnologías verdes, digitales o nuevos procesos.

Esto permitiría aumentar la cantidad de fondos de capital de riesgo, fondos de capital privado y fondos de etapas tempranas (o equivalentes) domiciliados en Chile, y que se inviertan en emprendimientos asociados a las tecnologías para la transformación de la minería sostenible, en ámbitos productivos y de desarrollo humano para las regiones mineras.

• **Generar desafíos competitivos de gran escala para innovación en minería verde:**

Articular desafíos de gran escala y complejidad, como los organizados por la Fundación X Prize⁵⁶, con objetivos claros y medibles, convocando a innovadores y emprendedores alrededor de desafíos comunes del sector minero nacional en temáticas disruptivas y fundamentales para la minería verde. El concepto sería estructurar estos desafíos de manera colaborativa al interior del sector minero, con fuentes de financiamiento importantes de la industria y cofinanciadas por el sector público y privado.

6.3 PROPUESTAS PARA FORTALECER EL FINANCIAMIENTO DE PROYECTOS ESTRATÉGICOS DE INVERSIÓN EN MINERÍA VERDE

6.3.1 MECANISMOS DE FINANCIAMIENTO PARA INVERSIONES PRODUCTIVAS EN MINERÍA VERDE CON APOYO PÚBLICO

Los compromisos de Chile de acción climática y la oportunidad de impulsar un desarrollo sostenible requieren que el Estado incentive la aceleración de las inversiones con tecnologías que permitan

55. Concepto que involucre las distintas formas de vinculación de las grandes empresas y corporaciones con las startups y emprendimientos, donde uno de los mecanismos consiste en la creación de un Fondo de Capital de Riesgo Corporativo con foco en la inversión en iniciativas de emprendimiento.

56. XPrize. <https://www.xprize.org/>

descarbonizar y descontaminar y que impulse un posicionamiento internacional verde de nuestras exportaciones y actividades productivas en general. En la medida que este desarrollo genera capacidades y proveedores de bienes y servicios tecnológicos, tendremos también un impacto en la demanda de empleo de calidad.

Se propone activar un conjunto de mecanismos de apoyo para el financiamiento de proyectos verdes, que contribuyan a la descarbonización y descontaminación de las actividades productivas en general y a la minería en particular, como el caso del CEFC de Australia, que creó un fondo de AUS\$ 10.000 millones para promover las inversiones verdes.

Propuesta

- **Fondo de inversión de economía sostenible e inversiones verdes por US\$ 1,000 millones en 10 años:** Se propone crear un Fondo de Inversión en Economía Sostenible e Inversiones Verdes, por US\$ 1.000 millones para un período de 10 años, administrado por CORFO. Este fondo se constituiría con una proporción de los recursos adicionales que se recaudarán por las regalías del Litio entre el 2022 y 2030. A partir de las proyecciones de precio y niveles de producción se estima que se recaudarán US\$359 millones para destinarse a subsidios para programas de investigación y centros tecnológicos, como los ya asignados Centro de Economía Circular, Centro de Electromovilidad o Instituto de Tecnologías Limpias. Adicionalmente, en el mismo período, se recaudarán regalías adicionales por unos US\$ 2.000 millones y se propone que la mitad sea destinada al Fondo propuesto.

Este Fondo reembolsable se invertiría casi en su totalidad en activos que no implican ex ante gasto público, ya que financiarán inversión

socialmente rentable, en condiciones más blandas que las de mercado. Como se trata de mecanismos reembolsables, permitiría proyectar su operación más allá de los 10 años previstos para ser invertido.

Los instrumentos que se desarrollarían serían:

- **Fondo de subsidio a estudio de preinversión a proyectos de inversión verde:** Programas de subsidios de preinversión, que permitan cofinanciar los estudios previos a la fase inversional, sean estos de factibilidad, ambientales u otros necesarios. Estarían disponibles para proveedores que desarrollen proyectos de inversión con contenido local, que sean tecnológicamente innovadores y que generen externalidades positivas en la formación de capital humano y de conocimiento.

CORFO podría coordinar esfuerzos con organismos multilaterales como el Banco Mundial, BID, la Unión Europea, o con entidades de otros países como la cooperación alemana, GIZ, o japonesa, JICA, con los que existe colaboración tecnológica y espacios de interés común en industrias y minería verde.

Este fondo, el único tipo subsidio entre los instrumentos propuestos, sería por US\$ 10 millones.

- **Fondo de Garantías de Crédito:** Ampliamente utilizadas en Chile y a nivel internacional, las garantías de créditos permiten mitigar los riesgos en un financiamiento otorgado por un intermediario financiero. A nivel local, se han utilizado principalmente para

apoyar empresas de menor tamaño, facilitando el acceso a créditos. En otros países, el Estado ha otorgado garantías para apoyar proyectos de mayor envergadura. En ese caso, se podría implementar un programa de garantías de crédito que facilite el acceso a financiamiento, a través de una garantía parcial al financiamiento que el sistema financiero le otorgue al desarrollador de proyectos estratégicos en minería verde. Este instrumento se podría diseñar e implementar desde CORFO, que tiene amplia experiencia en este tipo de programas.

Los programas de garantías consideran la constitución de fondos que las respaldan. Los recursos provendrían del royalty al litio y adicionalmente de financiamiento de bancos multilaterales o fondos especiales orientados a financiamiento verde (Fondo del Clima y fondos europeos). Los financiamientos externos, en general, consideran componentes de asistencia técnica que se podrían destinar a la estructuración del programa y seguimiento posterior. Asimismo, se podrían utilizar para subsidios de estudios de preinversión.

Este fondo de garantías sería por un monto de US\$ 500 millones, con lo que podría generar garantías por US\$ 3.500 millones y movilizar créditos por montos superiores.

• **Financiamiento a través de Intermediarios Financieros:** Apoyar el financiamiento de proyectos estratégicos a través de programas públicos de refinanciamiento es uno de los mecanismos más utilizados por los bancos de desarrollo de segundo piso. En este caso, el Estado otorga créditos a instituciones financieras para que ellas utilicen los recursos financiando al proyecto. Estos programas facilitan el desarrollo de los proyectos ya que: favorecen el acceso a financiamiento,

otorgando recursos a intermediarios financieros; reducen los costos financieros por cuanto los créditos otorgados por la institución pública son a tasas subsidiadas, y dan una señal de compromiso del Estado con los proyectos financiados.

En Chile, esta herramienta podría ser implementada por CORFO, dada su experiencia en este tipo de programas. Los créditos otorgados por los intermediarios financieros podrían acceder también a programas de garantías que se implementarían para apoyar estos proyectos.

Los recursos para los créditos provendrían de financiamientos de bancos multilaterales o fondos especiales orientados a financiamiento verde (por ejemplo.: Fondo Verde del Clima) y en menor proporción del Fondo de CORFO. Estos financiamientos, en general, consideran componentes de asistencia técnica, que se podrían destinar a la estructuración del programa y seguimiento posterior. Asimismo, se podrían utilizar para subsidios de estudios de preinversión.

Se propone prestar a largo plazo hasta US\$ 390 millones, en cofinanciamiento con fondos externos.

• **Fondos de Financiamiento a través de Fondos de Capital de Riesgo:** Una fuente de financiamiento atractiva para el desarrollo de los proyectos innovadores son los fondos de capital de riesgo. Constituidos con capitales privados, no solo otorgan recursos financieros a los proyectos, sino que también apoyan con la gestión. Así como ocurre en otros sectores, los fondos de capital de riesgo podrían aportar capital de largo plazo para el desarrollo de proyectos estratégicos en tecnologías verdes.

Se proponen dos mecanismos complementarios:

- Que CORFO aporte capital por hasta US\$ 50 millones a unos 8 Fondos de Capital de Riesgo, con una contribución al menos equivalente de privados, con un techo en el retorno de CORFO. Este mecanismo requiere una reforma legal, ya que CORFO no puede participar en títulos de capital. Lo importante es que estos fondos puedan financiar el escalamiento de negocios verdes, participando en series A y B de financiamiento.

- Adicionalmente, se propone aportar hasta US \$200 millones a un Fondo de Fondos con coinversión de inversionistas institucionales, para el desarrollo de la economía verde. Los inversionistas institucionales deberían aportar al menos el equivalente a CORFO.

Estos mecanismos de inversión de capital alinean los intereses de los aportantes privados del fondo y del Estado, y no generan distorsiones que lleven a minimizar los riesgos del portafolio, con una menor cantidad de proyectos innovadores financiados.

A este mecanismo se destinaría un monto del orden de US\$ 600 millones.

• **Emisión de Bono Verde Soberano para inversiones verdes:** Tal como se ha hecho con éxito desde el Ministerio de Hacienda, con la emisión de bonos verdes soberanos por cerca de US\$ 15.000 millones para financiar programas públicos de infraestructura en temas de sostenibilidad, se propone estructurar la emisión de un bono verde soberano que tenga

como foco proyectos asociados a inversión verde. El propósito es canalizar recursos e inversiones hacia activos verdes elegibles, con especial foco en las zonas mineras, que permitan potenciar el transporte limpio, la eficiencia energética, las energías renovables, el hidrógeno verde, el almacenamiento energético, la gestión del agua y la economía circular, entre otras oportunidades presentes.

Este bono permitiría generar financiamiento blando, de largo plazo a proyectos verdes, pudiendo generarse dos esquemas:

- Un mecanismo de intermediación a través de instituciones financieras.

- Un mecanismo para proyectos estratégicos con financiamiento de primer piso sindicado, en que el aporte de CORFO no puede superar el 40% del financiamiento y en condiciones equivalentes para todos los financistas.

6.4 MODELOS Y NUEVOS INSTRUMENTOS PARA PROYECTOS COLABORATIVOS QUE PERMITAN CAPTURAR SINERGIAS Y ECONOMÍAS DE ESCALA

El camino hacia una minería verde en Chile considera, entre otros desafíos, la reducción gradual de la huella de carbono en todos y cada uno de los proyectos mineros, donde actualmente el consumo de agua y energía constituye una parte importante de esta huella. La situación actual de suministro de energía y agua para cada proyecto minero es el resultado de una solución individual y de mercado bajo el marco regulatorio vigente, donde no existe una oferta colectiva dada por el Estado ni por el Mercado.

En estos ámbitos existe la necesidad de realizar importantes inversiones con economías de escala y costos hundidos, las soluciones descentralizadas de mercado no conducen a óptimos globales y en muchos casos generan sobre inversión, superposición de infraestructura redundante y externalidades ambientales negativas excesivas.

Dado lo anterior, es necesario impulsar proyectos colaborativos que permitan capturar sinergias y economías de escala que puedan aprovechar todos los actores, especialmente la pequeña y mediana minería que no tiene acceso a una solución individual eficiente.

Bajo esta mirada se abordan preliminarmente los ámbitos de Agua y Desalación, Energía Eléctrica y Almacenamiento, Hidrógeno verde.

6.4.1 AGUA Y DESALACIÓN

Propuesta

La institucionalidad existente no ha sido suficiente para abordar el desarrollo eficiente de estas inversiones indispensables para la sostenibilidad de las actividades mineras.

Una opción que se propone evaluar es la creación de una institución similar al Coordinador Eléctrico Nacional, encargada de la coordinación de cada cuenca, Coordinador Nacional de Cuencas, con las siguientes responsabilidades:

- Desarrollo de un Plan Indicativo de Desarrollo de aprovechamiento de aguas, incluyendo cantidad, tipo y ubicación de proyectos de producción de agua cruda (desalada) y los sistemas de impulsión y distribución.
- Coordinación de la Operación coordinada de producción y transporte de agua en la cuenca.

- Garantizar el acceso a los sistemas de transporte.
- Garantizar la calidad de servicio y seguridad de abastecimiento.

Si bien cada actor tendría la libertad de decidir el tipo y ubicación de proyectos de producción, el plan indicativo le ayudará a tener a la vista donde poder capturar economías de escala, compartiendo instalaciones de respaldos y de conducciones, además de hacer más expedita las aprobaciones de usos de suelos, impacto ambiental y otros permisos sectoriales. Idealmente, debiera considerarse la conducción de agua como servicio público y ser concesionada. Para estos efectos, se puede utilizar un marco institucional conocido, el de la ley de concesiones de obras públicas, lo cual puede quedar establecido por ley con la obligación de coordinación con la Institución Nacional de Coordinación de Cuencas.

La existencia de interacción sinérgica entre aguas desaladas, aguas servidas tratadas, y agua de fuentes naturales, con posibilidades de generar “swap” para reducir costos de impulsión, compartir acueductos para impulsión de aguas servidas tratadas y desaladas, entre otras opciones torna imprescindible fortalecer la coordinación entre los subsistemas. Es por ello que esta estrategia debe acompañarse de un fortalecimiento de la institucionalidad de gestión de recursos hídricos en general. En la actualidad existe una multiplicidad de organizaciones escasamente coordinadas. Está pendiente por más de una década la estructuración de una subsecretaría de recursos hídricos, en el Ministerio de Obras Públicas, con responsabilidad de política y coordinación más amplia de los diferentes actores públicos involucrados. La experiencia del sector eléctrico es un modelo interesante de considerar como meta a mediano plazo.

Actores

Productores de Agua, Transportistas de Agua, Empresas Mineras, Empresas de Servicios Sanitarios, la "empresa pública Desarrollo País o la futura Banca Nacional de Desarrollo" (Fondo de Infraestructura), Agricultores (demanda de riesgo). La Entidad Coordinadora Nacional se puede estructurar de manera similar al Coordinador Eléctrico, como una corporación de derecho público independiente y dirigida por un cuerpo colegiado elegido en consideración de méritos.

6.4.2 ENERGÍA Y DESCARBONIZACIÓN, MERCADO ELÉCTRICO Y ALMACENAMIENTO

Propuesta

Si bien tomará varios años para el reemplazo de todas las fuentes de generación contaminantes, la minería podría sustituir el 100% en un plazo mucho menor, pero de forma colectiva y social, a través de acciones tales como las siguientes:

- Renegociar sus contratos de suministro de energía con los generadores para que reemplacen el equivalente a la energía contratada por generación 100% renovable ubicada en cualquier punto del SEN (Sistema Eléctrico Nacional).
- Incorporar sistemas de almacenamiento distribuidos a lo largo del SEN que haga técnicamente posible la conexión de más proyectos ERNC. Estos proyectos pueden ser Baterías ubicadas centralizadamente en Subestaciones Principales del SEN o bien distribuidas en barras de ingreso a los sistemas de distribución o de clientes libres. También puede ser grandes centrales de bombeo, ámbito en el que hay proyectos en etapa de desarrollo.

Producción de Hidrógeno Verde y celdas de combustibles individuales ubicados en barras de proyectos ERNC o colectivos ubicados en puntos de saturación de inyecciones del SEN.

Actores

Generadores, Transmisores, Empresas Mineras y Grandes Clientes, Empresas Distribuidoras, Coordinador Eléctrico Nacional. Por parte del Estado: Ministerios de Minería y Energía, Medioambiente y Comisión Nacional de Energía.

6.4.3 HIDRÓGENO VERDE - VALLES DE HIDRÓGENO

Propuesta

Se propone que el Estado promueva la colaboración entre las empresas mineras y energéticas y la capacidad de entidades de investigación y desarrollo tecnológico nacional e internacional relevantes para establecer en el norte de Chile espacios de pilotaje de soluciones de hidrógeno para la minería.

En la fase de escalamiento, el Estado puede incidir en la generación de soluciones integradas, que aprovechen economías de escala y que reduzcan los impactos ambientales. El Ministerio de Bienes Nacionales, Medio Ambiente, Energía y Minería pueden, actuando conjuntamente, incentivar soluciones sinérgicas en este ámbito.

Una opción que puede facilitar la coordinación es la facilitación del financiamiento de estas iniciativas a través de CORFO, ya sea intermediando créditos verdes u otorgando garantías en conjunto con entidades internacionales, así como con la participación de la "empresa pública Desarrollo País o la futura Banca Nacional de Desarrollo" (Fondo de Infraestructura).

Actores

Existen dos ámbitos de coordinación, el desarrollo de casos de uso para la minería y la articulación de soluciones de escalamiento que aprovechen economías de escala.

- Los actores para soluciones de escalamiento coordinadas son las Empresas Míneras, Empresas de Energía, Desarrolladores e Inversionistas. El Estado a través de los Ministerios de Bienes Nacionales, Medioambiente, Minería y Energía, CORFO, la “empresa pública Desarrollo País o la futura Banca Nacional de Desarrollo”.
- En el caso de generar iniciativas colaborativas de desarrollo de casos de uso para Minería, es necesario incorporar: Universidades, Centros Tecnológicos y Empresas de Base tecnológica, proveedores tecnológicos y proveedores de equipos para la minería.

6.4.4 INCENTIVOS PARA INTEGRAR LA INNOVACIÓN EN LOS PROYECTOS DE INVERSIÓN

Se propone el estudio de acciones regulatorias y de fortalecimiento institucional que agilicen la implementación de iniciativas innovadoras en proyectos de inversión; sin bien no se trata de mecanismos de financiamiento directo, sí requerirían de asignaciones presupuestarias para que los servicios públicos involucrados puedan reforzar sus cuadros técnicos y sus herramientas de trabajo.

Propuesta

Establecer una taxonomía o clasificación de proyectos cuyo propósito sea de validación de tecnologías, a las cuales se les aplicarían procesos de tramitación de permisos diferenciados y más ágiles.

Al establecer legalmente una distinción que identifique proyectos o iniciativas de pilotaje y validación a escala real, realizados en un tiempo acotado (por ejemplo, máximo 2 años) y en condiciones controladas y segregadas de la operación regular de los proyectos mineros, servicios públicos como el Sernageomin y otros que entregan permisos sectoriales deberán o podrán autorizar la iniciativa con la sola presentación de un documento (Informe estándar) donde se detallen las actividades a realizar y se declaren las responsabilidades y compromisos de la compañía minera en relación al cumplimiento de las normas y criterios vigentes. Entre los compromisos a asumir por las empresas está la generación y entrega de información y conocimiento transparente a los órganos reguladores y fiscalizadores, que permitan al final de la experiencia, de resultar viable la tecnología, contar con antecedentes para un mejor procesamiento de los permisos definitivos para la implementación de la tecnología. Esto requeriría un cambio legal.

Desarrollar guías o permisos especiales

Estandarizar o definir guías, permisos especiales o normas para caracterizar el proceso de innovación en etapas tempranas y avanzadas. Fijar un horizonte temporal para su desarrollo, para que se realicen las actividades necesarias para terminar el ciclo de innovación o declarar que no fue posible terminar con éxito la innovación. En caso de tener una innovación exitosa, la nueva tecnología podría incorporarse al proceso de licenciamiento tradicional, y con ello permitir impacto territorial y desarrollo de las cadenas locales de abastecimiento. De esta forma se genera un espacio en los procesos de autorización de permisos y de evaluación ambiental y social para realizar las pruebas piloto que requiere una innovación sin generar riesgos o incertidumbres a los proyectos. Esto, especialmente en tecnologías en etapas tempranas del ciclo de innovación, que pudieran concentrarse en áreas prioritarias y trascendentales para el país, como la minería verde.

Fortalecimiento institucional

La capacidad de los servicios públicos para evaluar proyectos de innovación está limitada por dos factores: Capacidad de absorber proyectos y deficiencia técnica de los evaluadores. Sin embargo, Chile intenta ponerse a la vanguardia en temas de eficiencia energética, hidrógeno verde, carbono neutralidad, conservación de la biodiversidad, etc., todas iniciativas que requieren permisos sectoriales y ambientales.

Se proponen dos modelos de trabajo que podrían colaborar a resolver el problema:

- Modelo de agenciamiento: Establecer un equipo especial para evaluar proyectos de innovación tecnológica, al interior de cada uno de los servicios públicos vinculados al ciclo de innovación minero (Sernageomin, DGA, SEA). El equipo debe estar formado por especialistas técnicos de alto nivel, con sueldos competitivos de mercado, financiado por partidas específicas del presupuesto de los servicios aprobados por el Congreso.
- Alineamiento político de los servicios: Establecer un acuerdo transversal de los servicios públicos involucrados en la evaluación de proyectos de innovación tecnológica mineros, para cumplir dos aspectos básicos de la evaluación que hoy no se cumplen:

- Tiempos regulados de procesamiento de los proyectos.

- Ámbito de actuación de los Servicios públicos.

Este acuerdo debiera involucrar al menos los siguientes servicios: SEA, CONAF, SAG, Consejo de Monumentos Nacionales, Sernageomin. El acuerdo debiera articularse desde la SEGPRES y podría surgir

de un “mandato” desde el Congreso, respaldado por aprobación de más recursos a los servicios para reforzar a los equipos existentes.

6.5 PROPUESTAS DE MARCO INSTITUCIONAL PARA LA IMPLEMENTACIÓN Y FINANCIAMIENTO DE LA ESTRATEGIA DE MINERÍA VERDE

6.5.1 MARCO CONCEPTUAL PARA EL DISEÑO DE UNA GOBERNANZA EFECTIVA

Para avanzar en un marco institucional que viabilice la estrategia de minería verde es necesario caracterizar el accionar del país en el apoyo a las actividades de Ciencia, Tecnología, Innovación y Emprendimiento (CTiE), distinguiendo entre los diferentes niveles de decisión referentes a ellas.

Visión Estratégica: Se refiere a aquellas decisiones tomadas por el sector público de apoyar actividades de largo plazo, cuyos resultados no se manifiestan en un horizonte próximo, pero dan sentido y orientación a los esfuerzos del país. El nuevo marco legal recientemente aprobado en Chile establece por ley el requisito de contar con una Estrategia Nacional de Ciencia y Tecnología, apoyada por elementos institucionales y de dirección estratégica que tengan carácter de Estado, con autonomía técnica y ciclos diferentes a los políticos, para garantizar la visión de largo plazo.

Dimensión Política: Se refiere a aquellas acciones que generalmente son responsabilidad del gobierno de turno. Son las directrices que el Gobierno en su plazo de permanencia en el poder traza en materia de Ciencia, Tecnología e Innovación. Muchas de estas intenciones están plasmadas en los programas de gobierno. Es deseable que tanto la visión estratégica

como la política sean consistentes. Para el caso chileno, el nuevo esquema institucional donde se exige contar con una Política Nacional de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación que vaya acompañada de un Plan de Acción de mediano y corto plazo.

Implementación: Es la materialización de la política, a través de las agencias de CTiE, programas, concursos, reglamentos y proyectos, entre otros.

Ejecución: reúne al conjunto de entidades y actividades de CtiE, beneficiarios del accionar público. Destacan los científicos, universidades, empresas y otras instituciones del sector privado y la sociedad civil organizada.

Si bien este grupo de trabajo no discutió las justificaciones del accionar público en el contexto de CtiE en la minería, existen problemáticas y riesgos, que la literatura económica ha denominado fallas de Estado, las que se describen a continuación.

Inconsistencia dinámica: situaciones donde el accionar del sector público involucra una elevada asignación de recursos, los objetivos de esta actividad no se alcanzan en el corto plazo y sus beneficios no son claramente tangibles. Las actividades orientadas a potenciar el desarrollo de la ciencia y tecnologías requieren de una inversión sistemática de recursos. Los resultados del apoyo a estas actividades son solamente visibles a largo plazo y se materializan mediante la generación, difusión y transferencia de nuevo conocimiento.

En ese sentido, las prioridades de largo plazo entran en conflicto con los ciclos políticos que son más cortos, incentivando que se focalicen recursos en proyectos alcanzables en plazos más breves, cuyos resultados sean claramente tangibles para la sociedad. En la misma línea, otro elemento a considerar es, por ejemplo, la rapidez de los cambios tecnológicos, que hacen difícil al Estado ser proactivo en temas regulatorios y

agudiza las fallas de mercado en cuanto a información asimétrica. En síntesis, si bien la autoridad puede estar consciente que esta problemática es un tema urgente y fundamental, puede optar por otro tipo de proyectos empujado por presiones políticas y electorales, con el objetivo de mantenerse en el poder.

Problema de Agencia: Es necesario distinguir entre dos individuos económicos, el agente y el principal. En esta situación, el principal (dueño o responsable de los recursos) depende del actuar del agente (administrador de los recursos). El problema se origina cuando ambos poseen intereses y objetivos distintos. Además, en este contexto se generan problemas de información asimétrica, pues el agente, por la naturaleza de su trabajo, sabe más sobre el estado real de la situación de la organización que el principal. En el contexto que motiva a este documento, el principal sería el jefe de la cartera/ministerio a cargo de las temáticas de ciencia y tecnología, quien entiende en líneas generales las políticas públicas orientadas a estos temas. En tanto que, el encargado del departamento u organismo que ejecuta estos lineamientos sabe los verdaderos detalles y estado real de los programas, por lo cual es el agente. Otra arista es determinar sobre quién radica la responsabilidad de la política pública de ciencia y tecnología, pues en ocasiones la respuesta no es clara. Esto se hace más evidente cuando hablamos de innovación, pues es una temática tan transversal que puede ser desarrollada desde distintos ministerios y agencias. La única forma de resolver el conflicto de agencia es que existan claras líneas de mando y responsabilidad entre agente y principal.

Captura: Se refiere a cuando se logra resolver una falla de mercado u otra situación que requiere del accionar explícito del Estado, mediante la transferencia de recursos a un grupo y el Estado se ve imposibilitado de suprimir aquellos beneficios debido al costo político que involucra. Esto puede evidenciarse de sobremano en los programas destinados a incubar emprendimientos,

donde una vez terminada la fase inicial de apoyo, los emprendedores siguen demandando soporte financiero público. Por otra parte, en el contexto de las ciencias, existen áreas donde el financiamiento debe ser permanente, como es el caso de las ciencias base, pues nunca se van a financiar privadamente.

En virtud de estas distinciones analíticas, se propone un conjunto de medidas y acciones que fortalezcan, desde la mirada institucional, la implementación de una estrategia nacional de minería verde. A continuación, se elaboran algunos principios generales y en la siguiente sección se proponen algunas medidas específicas.

- La estrategia de desarrollo de una minería verde basada en la transformación productiva con incorporación creciente de contenido científico y tecnológico local debe formar parte de la estrategia nacional de CtiE, albergada al interior del Consejo Nacional de Innovación para el Desarrollo. Ello, con el fin de aprovechar las complementariedades, tener una visión común sobre el aprovechamiento de los recursos naturales en general y darle consistencia en el mediano y largo plazo.
- El responsable político de la implementación de dicha estrategia en planes y políticas específicas dependerá del Ministerio de Minería. Para ello se elaborarán documentos de política minera que serán la hoja de ruta de los gobiernos, los cuales podrán dar énfasis y marcar hitos propios de una administración democráticamente elegida. No obstante, el diseño de la política deberá ser consistente con la mirada de mediano y largo plazo contenida en la estrategia nacional minera.
- Dicha política se articula en torno a un conjunto de programas, proyectos y medidas que le dan consistencia interna, los que pueden

ser implementados por más de una agencia u órgano estatal. Por ejemplo, se propone que la ejecución de los programas vinculados con la CtiE pueda ser a través de la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID), dependiente del nuevo Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación. De igual modo, otros programas y acciones de política podrán ser ejecutados a través de CORFO, mediante su propia estructura o la figura de los “Comités Corfo”, pero presididos por el ministro de Minería. La ejecución de programas para la formación de capital humano a nivel técnico podrá ser a través del ministerio de Educación o del Trabajo, y así sucesivamente.

- La responsabilidad presupuestaria, de contar con los recursos suficientes para llevar adelante dichas acciones, dependerá del Ministerio de Minería, el que podrá buscar apoyo en los ministerios relacionados a través de los cuales se ejecutan parte de estas acciones (MCTCI, Ministerio de Economía, Ministerio del Trabajo u otros) en las discusiones de presupuesto ante la Dirección de Presupuesto (DIPRES).

6.5.2 PROPUESTA DE GOBERNANZA E INSTITUCIONALIDAD PARA EL FINANCIAMIENTO DE LA MINERÍA VERDE

Una gobernanza efectiva para abordar la implementación y financiamiento de la minería verde va en la línea de abordar las principales debilidades de nuestro país destacadas en el informe del *World Economic Forum* de 2020, sobre la capacidad de crear los mercados del mañana en modelos de articulación público-privada.

Como indican diversos modelos orientados a la creación y aceleración de ecosistemas de innovación,

entre ellos el desarrollado por el *Massachusetts Institute of Technology*, MIT⁵⁷, existen diversos actores que deben ser parte de un ecosistema de I+D+i para su correcto desarrollo, cada uno con su rol específico. Junto al sector público y sus diferentes niveles ya individualizados, entre otros actores se identifica a: academia y centros del conocimiento, emprendedores/ innovadores, los inversionistas de fondos de capital de riesgo, medianas y grandes corporaciones.

En lo que refiere particularmente a la implementación y financiamiento de la minería verde, en su componente de I+D+i y proyectos estratégicos de inversión, destacan los siguientes actores:

- Gobierno, incluyendo principalmente a los ministerios de Minería y Energía, de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación y a las agencias CORFO y ANID.
- Empresas mineras, grandes, medianas y pequeñas.
- Emprendedores/innovadores, representados por los proveedores de la minería y startups.
- Academia y centros del conocimiento.
- Fondos de inversión.

Por último, para la consolidación de los modelos de desarrollo y colaboración público-privados, es fundamental el rol de “Otros Actores Clave” caracterizados por Budden y Murray. En este sentido, el sector minero de Chile cuenta con la Corporación Alta Ley, una “organización de 2º piso” llamada a orientar y coordinar a los actores del ecosistema de innovación y tecnologías de la minería, por medio de la generación de visiones de largo plazo y de consenso “multi-stakeholder” para el desarrollo del sector.

En línea con la propuesta de consolidación del modelo

colaboración público-privado presentada por la mesa de “Innovación y Cadena de Valor” de la Política Nacional de Minería (PNM) 2050, se reafirma el rol crítico que debe seguir cumpliendo la Corporación Alta Ley en dos niveles: con su Gobernanza Multiactor, en la generación de consensos, visiones de largo plazo del ecosistema de innovación en minería y seguimiento del avance de la estrategia; y con su Equipo Ejecutivo, en el soporte técnico al Ministerio de Minería, con herramientas de prospectiva tecnológica, elaboración y actualización de hojas de ruta, perfilamiento de iniciativas prioritarias y monitoreo/seguimiento del portafolio de proyectos, así como en la ejecución directa de bienes públicos sectoriales.

Para materializar lo anterior, junto con las propuestas, se sugieren las siguientes medidas específicas de financiamiento:

- Que el Ministerio de Minería cree la Unidad de Ecosistema de Innovación en Minería, en la División de Fomento y Desarrollo Minero, especializada en innovación, prospectiva tecnológica y desarrollo estratégico permanente del ecosistema minero del futuro, que trabajaría en coordinación con las agencias encargadas de los temas CTiE , ANID y CORFO, y se apoyaría en las capacidades de la Corporación Alta Ley como entidad de soporte técnico y de ejecución de bienes públicos sectoriales. Para ello, es necesario:

- ◉ La presentación, por parte del Ministerio de Minería, de una Iniciativa Programática ante DIPRES, para crear la Unidad, su aprobación ex ante y consecuente inclusión en la Ley de Presupuesto, con una proyección plurianual a 4-5 años.

- ◉ La firma de un Convenio de colaboración con traspaso de recursos

57.

P. Budden, F. Murray. 2019. MIT's Stakeholder Framework for Building & Accelerating Innovation Ecosystems. Working paper, published by MIT's Laboratory for Innovation Science & Policy.

entre el Ministerio de Minería y la Corporación Alta Ley, para diseñar una hoja de ruta detallada y plan de iniciativas priorizadas a 4-5 años.

- Que el Ministerio de Minería, en coordinación con el Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación, y el Ministerio de Hacienda, cree un Fondo de Innovación del Ecosistema Minero, el que contará con 3 subfondos específicos como mecanismos para asignar recursos, con un compromiso de US\$ 1.000 millones en 10 años, con presupuestos indicativos plurianuales a 4-5 años. Los fondos serían:

- ◉ Fondo de Bienes Públicos y Bienes Club, centros de investigación tecnológicos precompetitiva asociativa para desafíos colectivos del sector, para encomendar a ANID y CORFO la implementación de planes anuales de concursos y llamados.

- ◉ Fondo de subsidio contingente a la innovación para escalamiento de tecnologías para la minería, para encomendar a CORFO su puesta en marcha y gestión.

- ◉ Fondo de formación e inserción de capital humano avanzado en el ecosistema minero, para encomendar a ANID su puesta en marcha y gestión.

- Que CORFO, en coordinación con el Ministerio de Economía y el Ministerio de Hacienda cree el Fondo de Economía Sostenible e Inversión Verde por US\$ 1.000 millones, que articule los mecanismos de subsidios de pre-inversión, créditos verdes para intermediarios financieros,

garantías y financiamiento de fondos de inversión, activando colaboración con entidades de financiamiento internacionales y multilaterales.

- Que el Ministerio del Interior, a través de la Subsecretaría de Desarrollo Regional, coordinación con el Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación, rediseñen el mecanismo de asignación regional de recursos del impuesto específico a la minería, permitiendo apalancar otros fondos regionales específicos propios, como el Fondo Nacional de Desarrollo Regional (FNDR), especialmente orientado a zonas de desarrollo minero. Dichos fondos regionales deberán contar con una gobernanza que asegure la no duplicidad de esfuerzos, busque el apalancamiento con recursos nacionales, sea consistente con la estrategia minera, la cual tendrá direccionamientos regionales y será pertinente a los problemas y desafíos que tiene la industria minera en esas regiones.

6.6 COORDINACIÓN CAPÍTULO

Coordinación Capítulo 6: Marcela Angulo.
Secretaría de Actas: Alejandra Molina.

Integrantes de subcomités que elaboraron la propuesta:

Subcomité Financiamiento I+D+i: José Miguel Benavente, Eduardo Bitrán, Pamela Chávez, Carlos Ladrix, Fernando Lucchini, Andrés Mitnik, Víctor Pérez, Javier Ruíz del Solar.

Subcomité Financiamiento de Inversiones Estratégicas: Eduardo Bitrán, Gonzalo Cid, Héctor Lagunas, Fernando Lucchini, Luis Felipe Oliva, Juan Somavia, Nicolás Winter.

CONCLUSIONES

Al término de trabajo que da como resultado la presente propuesta y a casi un año de emprender la iniciativa, a nivel global vemos señales de que no solo se acelera la transición a una economía baja en carbono, sino que también aumenta la preocupación sobre la crisis ecológica y se escucha que la transición debe ser justa, para una mayor prosperidad global e inclusión. Se percibe que todos estos desafíos están interconectados, que son mutuamente interdependientes y prácticamente no existen dudas de las enormes transformaciones que viviremos en las próximas dos décadas asociadas a los ajustes que requieren los sistemas productivos y patrones de consumo para tener una economía sostenible económica, social y ambientalmente.

Localmente, estamos ad portas del inicio de un nuevo gobierno y durante el presente año, la conclusión del trabajo de la Convención Constitucional, ambos, con una expectativa general de que se sientan las bases para un nuevo período en Chile.

La pregunta en torno a cómo lograr una prosperidad sostenible es hoy altamente pertinente, no sólo por lo antes mencionado, sino que también ante un escenario de una pandemia que nos acompaña desde hace dos años, que ha tenido un impacto económico y social que requerirá de importantes medidas para una recuperación.

Ante el contexto desafiante descrito anteriormente, presentamos una de las oportunidades para Chile en las próximas décadas en torno a que nuestro país se consolide como líder en producción responsable de minerales, lo que nos llevará a dar un salto de prosperidad probablemente inédito. A esa producción responsable de minerales la hemos llamado minería verde.

A continuación, resumimos las principales propuestas

Descarbonización, acceso a mercados y desafíos tecnológicos.

El sector minero ha iniciado esfuerzos de reducción de emisiones focalizándose, primero, en un uso más eficiente de la energía y en el reemplazo de fuentes de combustibles fósiles por energías limpias. Desde la matriz eléctrica, el sector minero ya comenzó a adquirir contratos de suministro en base a energías renovables y actualmente cerca de 2/3 del consumo del sector es abastecido por renovables. El hidrógeno verde (HV) y la electromovilidad podrían jugar un rol clave.

Junto con disminuir las emisiones, es muy relevante contar con sistemas de trazabilidad confiables; aquí el *blockchain* puede jugar un rol relevante.

Ahora bien, no será posible alcanzar la carbono neutralidad sobre la base de las nuevas tecnologías. También será necesaria la compensación. En este ámbito, Chile podría presentar un importante potencial de compensaciones asociado a Soluciones Basadas en la Naturaleza, las que además de beneficios económicos, proporcionan numerosos dividendos ambientales y sociales.

Respecto de las soluciones tecnológicas hay tres iniciativas, de distinta índole, que aparecen como oportunidades que la minería puede aprovechar para avanzar hacia la carbono neutralidad, la electromovilidad, avanzar en la cadena de valor del litio a través de la elaboración de materiales de litio con valor agregado y el desarrollo de una industria del hidrógeno verde.

Junto con promover el desarrollo de un “ecosistema de innovación”, impulsado con una estrategia de innovación para el desarrollo de una minería verde, este debe ir acompañado por un aumento significativo de la

inversión en capital humano, transferencia tecnológica e investigación y desarrollo (I+D) necesario junto con desarrollar alianzas con actores internacionales, tanto por acceso a capital como a conocimiento. El desafío es poder participar en cadenas globales de producción y redes globales de conocimiento.

Recurso hídrico y adaptación al cambio climático

En lo que se refiere a los ecosistemas relacionados con el agua se puede aportar esfuerzos técnicos y financieros para restaurar aquellos ecosistemas afectados por operaciones pasadas, considerando los efectos del cambio climático. Junto con ello, impulsar la innovación para minimizar el impacto sobre los ecosistemas marinos ante la creciente tendencia del uso de agua desalada.

También se sugiere crear un sistema de gestión integrada de recursos promoviendo la constitución de Comunidades de Usuarios de Cuencas, que se identifiquen como elementos clave para la gestión integrada de recursos hídricos con instancias de participación, capacidades técnicas disponibles para todos los actores, y recursos para la medición, gestión y transferencia de información.

Asimismo, impulsar la adaptación al cambio climático, en una perspectiva de trabajo colaborativo con las comunidades aledañas, permitiendo establecer planes de acción y reforzar canales de transporte, comunicación y suministro orientados a dar continuidad operacional ante potenciales riesgos climáticos.

En el ámbito de la eficiencia en el uso del agua en el contexto de cambio climático, se sugiere avanzar en proporcionar información trazable, verificable y pública sobre el uso del recurso hídrico, el estado actual y proyección en los territorios de concesión minera, y la influencia que tiene la minería, otras industrias y asentamientos humanos, aplicando estándares internacionales.

Y respecto de las soluciones tecnológicas se proponen las siguientes:

- Considerar la tecnología asociada a ZLD (Zero liquid discharge) en el proceso de desalinización, o en su defecto la recuperación de compuestos de interés a partir del concentrado o rechazo.
- Aumentar los esfuerzos en optimizar el consumo de energía en el bombeo del agua desalada hacia la planta. Podría plantearse el uso de hidrógeno verde.
- Proyectar que la desalación por osmosis inversa será con nano membranas, membranas con inclusiones de grafeno y membranas ABM.
- Responder a desafíos tecnológicos para la correcta medición de extracciones de agua y plataformas de gestión de la información recopilada.
- Promover cambios institucionales que faciliten la constitución de Comunidades de Usuarios de Cuenca activas, con capacidad de gestión.
- Monitorear ecosistemas: identificar indicadores, desarrollo y despliegue de tecnologías y gestión de información.
- Crear, en las empresas mineras, una unidad de uso sustentable del recurso hídrico.

Biodiversidad para operaciones sostenibles:

En este ámbito se distinguen tres grandes desafíos: El fortalecimiento de la autoridad ambiental en el más breve plazo. Ello debe ir en la línea de la creación de un Servicio de Biodiversidad y Áreas Protegidas, reduciendo incertidumbres y dispersión, y definiendo con claridad acciones de conservación dentro y fuera

de las áreas protegidas, con un amplio espacio para el involucramiento de la sociedad civil y las empresas. Por otra parte, un mayor incremento de las capacidades institucionales para el aumento del conocimiento, así como también para mejorar los parámetros y criterios del SEA para hacer de la institucionalidad ambiental un espacio de credibilidad, de protección ambiental y de certezas.

Otro desafío es el de conocimiento: Algunas áreas de conocimiento que aún presentan deficiencias son los efectos de la desalinización sobre los ecosistemas marinos; las relaciones hidrogeológicas en diversos tipos de humedales en cuencas endorreicas y exorreicas; la evolución de hábitat críticos para la biodiversidad y restauración de humedales.

La implementación de redes de conocimiento o centros de investigación interdisciplinarios con universidades regionales y organizaciones especializadas en la práctica de la conservación, para crear plataformas de conocimiento integrado permanente, puede ayudar a cubrir brechas y favorecer procesos complejos, basados en enfoques adaptativos.

También se proponen las siguientes metas:

- Actualizar el estado del conocimiento de biodiversidad en áreas donde opera la minería.
- Desarrollar líneas de investigación, para ampliar el conocimiento y comprender de mejor manera el posible efecto de la operación de campos de pozos subterráneos sobre acuíferos actuales y abandonados.
- Estandarizar información sobre biodiversidad y acceso a través de sistemas públicos disponibles.
- Aumentar el conocimiento de la biodiversidad marina asociada a la operación de plantas desaladoras.

- Establecer un sistema de monitoreo público-privado para conocer el comportamiento de las descargas y toma de agua de mar desde las plantas desaladoras.
- Implementar sistemas de monitoreo en tiempo real de humedales andinos y alto-andinos, comportamiento de acuíferos y lagunas de salares.
- Restauración de ecosistemas.
- El Ministerio de Medio Ambiente evalúa un portafolio de Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN) aplicables a zonas impactadas por actividades mineras.

Procesamiento de concentrados, minería secundaria, reciclaje y pasivos ambientales

Relaves: Considerando el carácter masivo de los relaves es impensable una valorización y eliminación completa del residuo. Por lo tanto, es necesario estudiar y desarrollar soluciones innovadoras que permitan el retorno de los relaves a la zona de extracción minera o a su entorno directo, asegurando su estabilidad física y química y una minimización de los impactos. Y en el largo plazo, habilitar una minería sin relaves.

Un segundo elemento clave en una operación más sustentable es el ahorro de insumos críticos, como el agua. Una mayor concentración de sólidos en los relaves posibilita:

- Incrementar la recirculación de agua y reducir el consumo neto de agua fresca.
- Aumentar la estabilidad física y química de los depósitos.
- Alargar la vida útil de los depósitos al disminuir los volúmenes a depositar.

Otra oportunidad se refiere a la recuperación de elementos/minerales de valor desde los relaves o en las mismas plantas de procesamiento donde se generan. Asimismo, se debe estudiar la eliminación de elementos/minerales potencialmente contaminantes antes de su disposición final, generando un residuo inerte que puede reutilizarse en obras civiles, rellenos o cubiertas de otros residuos, o en la elaboración de materiales geo- polímeros, entre otros.

Todos estos esfuerzos pueden aplicarse también a los depósitos de relaves abandonados y no operativos, tomando como base la Política Nacional de Depósitos de Relaves.

Una vía por explorar en forma sistemática, colaborativa y de largo plazo es apuntar a una minería que minimice los relaves y/o los elimine allí donde sea posible. Para ello, se visualizan 3 opciones:

1. La transformación completa de los procesos reemplazándolos por otros, por ejemplo, la lixiviación in situ. Esto implica desarrollar formas de lixiviar depósitos de sulfuros, secundarios y primarios.
2. El retorno de los relaves a la mina. Esto se aplica, en forma parcial, en el relleno con relaves espesados de Caserones o de rajos fuera de operación y con una configuración o *layout* conveniente para esta opción. Sin duda se requiere desarrollar nuevas técnicas y/o tecnologías de transporte de pulpa más eficientes.
3. La transformación sustentable de los relaves en un material distinto, de manejo más simple y seguro, que pueda utilizarse en construcción o como materia prima para otros procesos, por ejemplo, en la fabricación de fertilizantes.

Minería secundaria y economía circular: Se busca mayor recuperación de valor contenido y nuevas soluciones que utilicen residuos para fines productivos, además de vincular a la minería como agente de tracción de la economía regional, para reducir, reciclar y reutilizar sus residuos y capturar valor en cada etapa permitiría fortalecer vínculos y generar valor compartido empresa-comunidad.

Como meta, se espera que hacia fines de esta década se pueda habilitar un centro de minería secundaria en región minera evaluada, que considere un análisis en los ámbitos económico, social y ambiental. Y al 2040, reducir, reutilizar y reciclar un 100% de los residuos susceptibles de reciclar generados en operaciones mineras; reducir el stock de residuos mineros masivos susceptibles de reutilizar (relaves, ripios, lastre, etc.) y los escoriales susceptibles de reutilizar, en a lo menos un 90%, por reutilización en reemplazo de áridos.

La clave en este ámbito es la creación de nuevos modelos de negocios y coordinaciones que faciliten la relación de la minería con otros sectores productivos.

Generar nuevas fundiciones (FURE) Sustentables y competitivas, y una mayor capacidad de procesamiento en la cadena minero-metalúrgica: aquí se concluye que una industria metalúrgica eficiente y de última generación es clave para aprovechar una mayor fracción del valor generado en la minería, ya que un mayor procesamiento local impacta en el desarrollo industrial, tecnológico y social. Considerando, además, que la actividad de fundición es intensiva en energía y que la matriz energética chilena es más "limpia" que la de China -principal destino de nuestras exportaciones- al procesar en nuestro país contribuiremos a bajar las emisiones de Gases con Efecto Invernadero (GEI).

Asegurar una capacidad de fundición y refinación local, capaz de competir en términos ambientales y de mercado con las fundiciones más avanzadas del mundo y que considera el uso de combustibles

sustentables como hidrógeno para producir con una mínima huella de carbono es el ambicioso desafío. Tener fundiciones en Chile constituye una clara ventaja económica, por la penalización que se debe pagar por los altos niveles de arsénico que se producen en Chile, más de 20.000 toneladas al año. La recuperación de subproductos y el reciclaje de residuos también son muy importantes para mejorar los resultados. En definitiva, las FURE constituyen una base material para el emprendimiento, nuevos negocios, la investigación, la formación de nuevo capital humano y desarrollo tecnológico.

Financiamiento de proyectos estratégicos e impulso a la innovación en minería verde

Este grupo de trabajo realiza un conjunto de propuestas en la línea de una arquitectura de financiamiento conectada a la política sectorial y al ecosistema de ciencia y tecnología, para favorecer la innovación y las alianzas público-privadas, para que nuestro país logre desarrollar una minería de clase mundial, exportadora de minerales sustentables y de productos y servicios intensivos en conocimiento.

Se reivindica el royalty minero, recuperando su vocación original y se plantean de manera extensiva los instrumentos que abarcan el proceso de innovación, desde el desarrollo de la ciencia hasta el escalamiento industrial, con orientaciones de mediano y largo plazo; diversidad de herramientas para desafíos de mediana y gran envergadura; y mecanismos variados de financiamiento: fondos, incentivos tributarios, subsidios reembolsables y no reembolsables, entre otros.

Resulta relevante destacar del diagnóstico cómo ha descendido el nivel de inversión de Chile en I+D+i como también, la constatación de que no se ha cumplido con el espíritu original del Royalty y que gran parte de la recaudación se ha destinado a otros fines, no a I+D+i, tanto a nivel nacional como de regiones.

Respecto de las características del ecosistema de innovación chileno, llama la atención la sostenida baja inversión en I+D+i en comparación con otros países mineros. No obstante, se excluye del análisis a los proveedores locales por estar clasificados en otra categoría industrial.

Desde la perspectiva de las patentes, Chile tiene una baja participación a nivel mundial y se observa una merma de vigor de la innovación en minería en el país en la última década, con lo cual ha perdido posicionamiento en la reciente ola de innovación minera mundial en temas como automatización, medio ambiente, procesos metalúrgicos, refinación u otros.

A esto se suma una cultura de baja colaboración y confianza en el país y poco respeto a la propiedad intelectual. Adicionalmente, las empresas mineras nacionales e internacionales con operaciones en Chile tienen pocos incentivos para el desarrollo de innovaciones con la participación de actores del ecosistema de innovación nacional y privilegian los desarrollos en otros entornos más avanzados tecnológicamente.

Cabe destacar que, desde mediados de la década pasada, ha existido un consenso bastante amplio e incluso una hoja de ruta para nuestro Chile país minero, como la elaborada por el programa Alta Ley, trabajo que se ha iterado en bastantes oportunidades, siendo la más reciente, la Política Nacional Minera 2050 liderada por el Ministerio de Minería. Lo importante de todas estas iniciativas es que cada vez han ido convocando a un número más amplio y variado de personas, profundizando la visión y dotándola de contenido.

Entre las propuestas para el financiamiento de proyectos estratégicos e impulso a la minería verde se destacan:

- Promover el uso del impuesto específico a la minería de forma íntegra a I+D+i.
- Creación de un Fondo de Innovación del Ecosistema Minero.
- Apalancamiento de capital privado para la inversión en I+D+i en minería verde.
- Aumentar la intensidad de I+D en las empresas mineras.

También se hacen propuestas para el financiamiento de proyectos estratégicos de inversión en minería verde la creación de un fondo de inversión de economía sostenible e Inversiones verdes por US\$ 1.000 millones en 10 años.

Asimismo, se describen modelos e instrumentos para proyectos colaborativos que permitan capturar sinergias y economías de escala en los ámbitos de:

Energía y descarbonización, mercado eléctrico y almacenamiento

Si bien tomará varios años para el reemplazo de todas las fuentes de generación contaminantes por ERNC, la minería podría sustituir el 100% en un plazo mucho menor, pero de forma colectiva y social, a través de acciones tales como las siguientes:

- Renegociar sus contratos de suministro de energía con los generadores para que reemplacen el equivalente a la energía contratada por generación 100% renovable ubicada en cualquier punto del SEN (Sistema Eléctrico Nacional).
- Incorporar sistemas de almacenamiento distribuidos a lo largo del SEN que haga técnicamente posible la conexión de más proyectos ERNC. Estos proyectos pueden

ser Baterías ubicadas centralizadamente en Subestaciones Principales del SEN o bien distribuidas en barras de ingreso a los sistemas de distribución o de clientes libres. También puede ser grandes centrales de bombeo, ámbito en el que hay proyectos en etapa de desarrollo. Producción de Hidrógeno Verde y celdas de combustibles individuales ubicados en barras de proyectos ERNC o colectivos ubicados en puntos de saturación de inyecciones del SEN.

Los actores que deberían participar son: Generadores, transmisores, empresas mineras y grandes clientes, empresas distribuidoras, Coordinador Eléctrico Nacional. Por parte del Estado: Ministerios de Minería y Energía, Medioambiente y Comisión Nacional de Energía.

Hidrógeno verde – valles de hidrógeno

Se propone que el Estado promueva la colaboración entre las empresas mineras y de energía y la capacidad de entidades de investigación y desarrollo tecnológico nacional e internacional relevantes para establecer en el norte de Chile espacios de pilotaje de soluciones de hidrógeno para la minería.

En la fase de escalamiento, el Estado puede incidir en la generación de soluciones integradas, que aprovechen economías de escala y que reduzcan los impactos ambientales. El Ministerio de Bienes Nacionales, Medio Ambiente, Energía y Minería pueden, actuando conjuntamente, incentivar soluciones sinérgicas en este ámbito.

Una opción que puede facilitar la coordinación es la facilitación del financiamiento de estas iniciativas a través de CORFO, ya sea intermediando créditos verdes u otorgando garantías en conjunto con entidades internacionales, así como con la participación de la “empresa pública Desarrollo País o la futura Banca Nacional de Desarrollo” (Fondo de Infraestructura).

Los actores para soluciones de escalamiento coordinadas son las empresas mineras, empresas de energía, desarrolladores e inversionistas. El Estado a través de los Ministerios de Bienes Nacionales, Medioambiente, Minería y Energía, CORFO, la “empresa pública Desarrollo País o la futura Banca Nacional de Desarrollo”.

En el caso de generar iniciativas colaborativas de desarrollo de casos de uso para Minería, es necesario incorporar: Universidades, Centros Tecnológicos y Empresas de Base tecnológica, proveedores tecnológicos y proveedores de equipos para la minería. Por último, se propone en detalle un modelo de gobernanza e institucionalidad para el financiamiento de la minería verde.

Sin duda se requiere de una dirección estratégica y definición política para impulsar un crecimiento sostenible en torno a una minería que renueva su posicionamiento como un actor mundial relevante que, junto con aprovechar la demanda por minerales derivada del dinamismo asiático y la transición energética; promueve una transformación económica que profundice la inserción de Chile en cadenas globales de valor, genera empleo de alta calidad, tiene una importante transferencia e innovación tecnológica y cree sistemas productivos circulares; que protegen y regeneran el capital natural y contribuyen así a abordar la crisis ecológica y social.

Lo anterior requiere de una base política y social amplia y, por otra parte, reconciliar las posturas que dicen que la huella social y ambiental de la minería es en parte, la responsable del estado actual del planeta asociado a un modelo de producción que va mucho más allá de la minería y la otra, postulada en este documento, que plantea que para un mundo más sostenible (en lo económico, social y ambiental) se requiere de más minería. Pero no de cualquier minería, sino de una minería responsable en la línea de lo descrito en estas páginas.

Necesitamos que se logre instalar un diálogo que supere la lógica de silos y que permita conciliar visiones sobre las posibilidades que enfrentamos como país, para así dar un salto de prosperidad de la mano de la minería verde, construyendo puentes a nivel de los territorios, el país, los países vecinos, la región y el mundo.

Sin duda estas propuestas son la antesala de un trabajo que requiere de otras etapas: Proyectar escenarios, incluyendo las oportunidades y los desafíos, y, en segundo lugar, definir agendas estratégicas en áreas potenciales de desarrollo (tal como las que se mencionan más arriba) que pueden ser impulsadas en torno al sector minero pero que transforme la economía más allá de la minería, a través de promover el desarrollo de sus encadenamientos productivos y establecer proceso de transferencia cruzada con otras industrias (tales como la energía y el transporte), que se integran con los territorios donde se emplazan y cuidan y regeneran el capital natural.

Esa nueva minería es:

- Proveedora de los minerales para una economía verde: Que provee aquellos minerales (tales como cobre o litio) que necesita una economía verde y sin combustibles fósiles, evitando los impactos socio-ambientales negativos, remediando los impactos históricos, regenerando el capital natural en los territorios donde se emplaza y compensando en algunos casos.
- Protagonista del cambio tecnológico, activa en innovación e inserta en cadenas globales: Para que el cambio tecnológico sea un motor de productividad, crecimiento y transformación productiva en las economías mineras como Chile, fortaleciendo encadenamientos mineros nacionales y locales, insertos en cadenas de valor globales e impulsores de soluciones para

una minería y economía de bajo impacto o verde y que impulsa una sofisticación de la matriz productiva a nivel nacional y de los territorios.

- Integrada con las economías de los países mineros y sus territorios: Para prosperar con paz social, promoviendo en cada territorio crear valor sostenible y colectivo, aprovechando a la minería como plataforma que, por escala y capacidades, genera soluciones que son compartidas y de beneficio mutuo que ayudan a establecer relaciones recíprocas y de mutuo aprecio.
- Atrae inversión verde de escala, calidad y responsable: Capaz de transformar y ampliar la base productiva bajo estándares ambientales, de sostenibilidad y gobernanzas (ESG) y según los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) a la vez que impulsa su transformación según lo planteado en los puntos anteriores.
- Cuenta con un Estado, regulación y marco institucional de calidad: Para ayudar a establecer una dirección, alianzas público-privadas-sociedad civil necesarias para impulsar una agenda colectiva que dinamice el efecto transformacional y multiplicador y que de manera ágil integre la incertidumbre en la toma de decisiones.

A N E X O S

A . 1 I D E N T I F I C A C I Ó N D E R E S I D U O S

Tabla 2: Identificación de residuos procedentes de operaciones mineras de cobre.

SECTOR	RESIDUO
Mina	<ul style="list-style-type: none"> • Marinas y lastres. • Desechos de aceros y restos de construcción. • Agua fondo de mina. • Residuos propios de la actividad humana (residuos domiciliarios). • Neumáticos usados. • Aceites y lubricantes.
Procesamiento	<ul style="list-style-type: none"> • Ripios. • Relaves. • Restos plásticos de sistema de riego ripios.
Fundición	<p>• Escorias: Clasificación: Residuo Minero Masivo No Peligroso. Cantidad producción: 4.7 Mt/año. Cantidad acumulada: 16.1 Mt acumuladas en 7 escoriales. Disposición autorizada: Escoriales autorizados ambiental y sectorialmente. Posibles usos alternativos: Base y subbase de caminos, arenado de metales, infraestructura urbana como reemplazo de áridos, fabricación hormigón.</p> <p>• Restos de Ladrillos Refractarios: Clasificación: Residuo No peligroso. Disposición Autorizada: Lo informado por cada generador (bodegas, acopios, entre otros). Posibles usos alternativos: Recuperación de metales, chancado y producción de arenas.</p> <p>• Lodos Planta de ácido: Clasificación: Residuo Peligroso. Disposición Autorizada: Confinación en lugar autorizado. Posibles Usos Alternativos: No existen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Polvos Metalúrgicos <p>Clasificación: Residuo Peligroso. Disposición Autorizada: Confinamiento en lugar autorizado y/o recirculación en el proceso. Posibles usos alternativos: No existen.</p>

Refinerías	<ul style="list-style-type: none"> • Restos de mantención de celdas electrolíticas. • Cátodos de acero inoxidable dados de baja (Se pueden vender como chatarra de fierro, previo desmantelamiento de la barra) • Barras catódicas dadas de baja (Se pueden vender como chatarra o recircular).
SX/EW	<ul style="list-style-type: none"> • Restos de mantención de celdas electrolíticas • Cátodos de acero inoxidable dados de baja. (Estos se pueden vender como chatarra de fierro, previo desmantelamiento de la barra). • Barras catódicas dadas de baja (Se pueden vender como chatarra o recircular). • Lodos anódicos de plomo (transformación en materia prima para recuperar Pb). • Restos de fase orgánica.
Campamento y oficinas	<ul style="list-style-type: none"> • Residuos domiciliarios. • Desechos de construcción, maderas, embalajes, latas. • Artículos electrónicos. • Lodos planta tratamiento de aguas. • Envases plásticos.

A N E X O S

A . 2 D E F I N I C I Ó N D E E S C E N A R I O S

Tabla 3: Definición de escenarios y situaciones esperadas en condición de alta regulación y exigencias del mercado.

Regulación		Baja	Alta
	Alta	<ul style="list-style-type: none"> • Trazabilidad de materias primas (opcional). • Impuestos en estudio. • LSO reportando. • Carbono neutralidad (opcional). • Residuos identificados, medidos y caracterizados. 	<ul style="list-style-type: none"> • 100% trazabilidad de materias primas. • Impuestos operativos (a emisión GEI y residuos). • LSO en la toma de decisión. • Carbono neutralidad (obligación) • Política cero residuos implementada, vinculado con terceros (simbiosis).
	Baja	<ul style="list-style-type: none"> • No es de interés 	<ul style="list-style-type: none"> • No es de interés

A N E X O S

A 3 A P U N T E M E T O D O L Ó G I C O

Las propuestas desarrolladas en este documento apuntan a generar tanto las condiciones de base, como iniciativas que permitan desarrollar en Chile una minería verde.

Aquí se recogen las herramientas vigentes y se suman nuevas, abordando todo el ciclo de la innovación: desde el desarrollo de ciencia, pasando por el desarrollo tecnológico, hasta el escalamiento industrial e incorpora todos los mecanismos existentes, públicos y privados.

Para la formulación de iniciativas del capítulo 6 se adoptó la metodología de evaluación de madurez tecnológica de los proyectos, conocida por la sigla TRL, Technology Readiness Level, que define 9 niveles, donde el más alto responde a la adopción total y exitosa de la tecnología en un entorno real y, el nivel inicial, a la investigación científica pura.

Las definiciones⁷ de cada etapa son:

TRL 1. Investigación básica:

En esta fase se desarrolla la idea y se comienza la transición de la investigación básica hacia investigación aplicada, pero todavía no hay ninguna actividad o aplicación productiva o de negocio concreta. Se genera información de respaldo.

TRL 2. Formulación de la tecnología

En esta fase se formula la tecnología y se observan aplicaciones prácticas que podrían llegar a ser una invención, las cuales pueden ser aún especulativas y puede no haber pruebas o análisis detallados que confirmen dichas hipótesis. Se busca corroborar las observaciones científicas identificadas en el nivel anterior.

TRL 3. Investigación aplicada - prueba de concepto

En esta fase se inicia la validación de la idea, la cual incluye actividades de investigación y desarrollo como estudios analíticos y pruebas a nivel laboratorio para validar físicamente las predicciones de los elementos separados de la tecnología, aunque estos aún no están integrados en un sistema completo.

TRL 4. Desarrollo a pequeña escala en entorno de laboratorio

En esta fase se integran los componentes básicos o elementos separados de la tecnología y se valida que funcionen en conjunto o como sistema a nivel laboratorio, con el objetivo de identificar el potencial de ampliación y cuestiones operativas. En esta etapa se genera información respecto del rendimiento del sistema.

TRL 5. Desarrollo a escala real

En esta fase se desarrolla el primer prototipo, es decir los componentes se integran de forma que la configuración del sistema sea similar a su aplicación final en casi todas sus características, pero su operatividad es aún a nivel laboratorio. En esta etapa se busca aumentar la fidelidad del sistema con el entorno real.

TRL 6. Prototipo validado en entorno simulado

En esta fase se realiza la validación del prototipo en condiciones similares a las que se espera vaya a funcionar, por lo que debe ser capaz de desarrollar todas las funciones requeridas por un sistema operativo y los procesos se amplían para demostrar el potencial industrial.

TRL 7. Prototipo validado en entorno real

En esta fase se demuestra que la tecnología funciona y opera en una escala pre-comercial, usualmente es donde se realiza una primera demostración o “corrida piloto” y pruebas reales para identificar los elementos específicos de la fabricación y de operación. En esta etapa el diseño final está prácticamente completo.

TRL 8. Prototipo comercial

En esta fase se demuestra que la tecnología funciona a nivel comercial a través de una aplicación a mayor o gran escala; las cuestiones operativas y de fabricación han sido resueltas y se elaboran los documentos para la utilización y mantenimiento del producto. En esta etapa se incorpora el diseño comercial.

TRL 9. Aplicación comercial

En esta fase el producto está completamente desarrollado y disponible para su adquisición, ya que la tecnología se encuentra en su forma final y operable en un sin número de condiciones operativas.

Las distintas etapas definidas pueden clasificarse en investigación, desarrollo e innovación como se muestra en la siguiente ilustración.

7. ROHKUS. ¿Cuáles son los 9 niveles de madurez de la tecnología (TRLs)? Recuperado de: www.gestionfondosmexico.mx/single-post/2016/07/22/niveles-de-madurez-de-la-tecnologia-g%C3%ADa-trls



Ilustración 1: Etapas metodología TRL.
Fuente: Elaboración propia

Esta metodología fue creada por la NASA en la década del '70 y luego adoptada por el Departamento de Defensa de Estados Unidos. En Europa, en 2010, la Comisión Europea (CE) aconsejó utilizarla en la evaluación de proyectos de investigación financiados por la Unión Europea (UE), y la adoptó en la formulación de desarrollo Tecnológico Horizonte 2020.

La metodología TRL permite una mejor gobernanza y facilita la toma de decisiones; ayuda a mejorar la gestión de riesgos y expectativas; y facilita el diálogo y relacionamiento con las entidades de apoyo y financiamiento.

En este documento se presentan diversas iniciativas de I+D+i (Investigación, Desarrollo e innovación) ancladas en esta metodología, que abordan áreas temáticas relevantes, las que se desarrollan en cada eje. Las iniciativas no son homogéneas y presentan distintos grados de profundidad, asociados a los distintos grados de avance de esta reflexión.

AGRADECIMIENTOS A:

Comisión Desafíos del Futuro del Senado
Presidente Senador Francisco Chahuán
Senador Luciano Cruz-Coke
Senadora Ximena Órdenes
Senadora Ximena Rincón
Senador Kenneth Pugh

Fundación Encuentros del Futuro
Vicepresidente Ejecutivo Guido Girardi
Lucas Mezzatesta
Fabián Donoso

Consejo Futuro del Senado
Secretaría Ejecutiva del Consejo Futuro
Carola Muñoz
Amelie Kim Cheang
Juan Walker
Carlos Vázquez
Hugo Opazo
Jessica Soto

Secretaría de la Comisión Desafíos del Futuro
Abogado Secretario: Julio Cámara Abogados
Ayudantes: Nicolás Montero, Magdalena Ascorra

Coordinación General
Alejandra Wood
Osvaldo Urzúa
Miguel Ángel Vergara

Contenido y Comunicación CESCO
Constanza Araya
América Rodríguez

Biblioteca del Congreso Nacional
Sección de estudios
Marek Hoehn
Mauricio Amar
Felipe Rivera
Boris Lopichich
Magdalena Cardemil
Víctor Soto
Mariano Ferrero
Leonardo Arancibia

Academia de Ciencias de Chile
Presidenta María Cecilia Hidalgo

Directorio de CODELCO
Presidente Máximo Pacheco

RECTORES, RECTORAS Y MIEMBROS DEL CONSEJO ASESOR FUNDACIÓN ENCUENTROS DEL FUTURO

Aisén Etcheverry, ex Directora Nacional de la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo, ANID
Emilio Rodríguez, Rector de la Universidad de Tarapacá
Alberto Martínez, Rector de la Universidad Arturo Prat
Rodrigo Alda, Rector de la Universidad Católica del Norte
Marcos Cikutovic, Rector de la Universidad de Antofagasta
Luis Alberto Loyola, ex Rector de la Universidad de Antofagasta
Forlín Aguilera, Rector de la Universidad de Atacama
Nibaldo Avilés, Rector de la Universidad de La Serena
Darcy Fuenzalida, Rector de la Universidad Técnica Federico Santa María
Nelson Vásquez, Rector de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
Osvaldo Corrales, Rector de la Universidad de Valparaíso
Patricio Sanhueza, Rector de la Universidad de Playa Ancha
Carlos Isaac, Rector de la Universidad Viña del Mar
Rosa Devés, Rectora de la Universidad de Chile
Ennio Vivaldi, ex Rector de la Universidad de Chile
Ignacio Sánchez, Rector de la Pontificia Universidad Católica de Chile
Rodrigo Vidal, Rector de la Universidad de Santiago de Chile
Elisa Araya, Universidad Metropolitana de Ciencias de la Educación
Marisol Durán, Rectora de la Universidad Tecnológica Metropolitana
Julio Castro, Rector de la Universidad Andrés Bello
Eduardo Silva, Rector de la Universidad Alberto Hurtado
José Antonio Guzmán, Rector de la Universidad de los Andes
Eva Flandes, Rectora Universidad SEK
Carlos Díaz, Rector DUOC UC
Alfredo Romero, Universidad de la República
Federico Valdés, Rector de la Universidad del Desarrollo
María Olivia Recart, Rectora de la Universidad Santo Tomás
Santiago González Larraín, Rector de la Universidad Central
Teodoro Ribera, Rector de la Universidad Autónoma de Chile
Rafael Rosell, Rector de la Universidad del Alba
Galvarino Jofré, Universidad Católica Cardenal Raúl Silva Henríquez
José Rodríguez, Universidad de San Sebastián
Patricio Manque, Rector de la Universidad Mayor
Pilar Romaguera, Rectora de la Universidad de las Américas
Claudio Ruff, Rector de la Universidad Bernardo O'Higgins
Rafael Correa, Rector de la Universidad de O'Higgins
Carlos Torres, Rector de la Universidad de Talca

Álvaro Rojas, ex Rector de la Universidad de Talca
Claudio Rojas, Rector de la Universidad Católica del Maule
Carlos Saavedra, Rector de la Universidad de Concepción
Mauricio Cataldo, Rector de la Universidad del Bio Bio
Christián Mellado, Rector de la Universidad Católica de la Santísima Concepción
Eduardo Hebel, Rector de la Universidad de la Frontera
Aliro Bórquez, Universidad Católica de Temuco
Hans Richter Becerra, Rector de la Universidad Austral de Chile
Oscar Garrido, Rector de la Universidad de Los Lagos
Natacha Pino, Rectora de la Universidad de Aysén
Juan Oyarzo, Rector de la Universidad de Magallanes

A LOS ACTORES DEL SECTOR MINERO,
CIENTÍFICOS/AS Y ACADÉMICOS/AS,
COLABORADORES DEL DOCUMENTO:

Alan García	Cristián Mosella
Aldo Cipriano	Cristian Rodriguez
Alejandra Figueroa	Cristóbal Girardi
Alejandra Molina.	Cynthia Torres
Alejandra Stehr	Dennis Vega
Alex Godoy	Diego Lizana
Álvaro García	Domingo Sáez
Álvaro Videla	Edgar Estupiñan
André Henríquez	Edmundo Claro
Andrés Camaño	Eduardo Álvarez Miranda
Andrés Landerretche	Eduardo Bitrán
Andrés Mitnik	Eduardo Campos
Andrés Ramírez	Elena Moreno
Andrés Volker	Elena Rocío Meneses Moreira
Ángela Oblasser	Emilio Castillo
Annie Duffey	Eva Tobar
Axel Christensen	Fernanda Valdivieso
Bárbara Saavedra	Fernando Flores
Bárbara Salinas,	Fernando Lucchini
Benjamín Maturana	Francisca Tondreau
Bernardita Fernández	Francisco Díaz
Brian Townley	Gladys Vidal
Camila Montes	Gonzalo Cid
Carla Lorenzo	Grecia Pérez de Arce
Carlos Gajardo	Guillermo Espinoza
Carlos Ladrix	Guillermo Olivares
Carlos Rebolledo,	Gustavo Lagos
Carlos Silva	Héctor Lagunas
Carmen Luz Contreras	Heidy Jofré
Carolina Cuevas	Hugo Valdes
Carolina Urmeneta	Humberto Estay
Christian Cintolesi	Ignacio Pérez
Christian Sanhueza	Ignacio Toro
Claudia Nuñez	Igor Wilkomirsky
Claudia Silva	Iván Valenzuela
Constanza Araya	Jacques Wiertz
Cristián Cintolesi	Jaime Villanueva Aguila
Cristian Echeverria	James Mcphee

Javier Ruíz del Solar
Jorge Bravo
Jorge Cantallopts
Jorge Sanhueza
Jorge Valverde
José Miguel Araneda
José Miguel Benavente
José Tomás Morel
Juan Carlos Román
Juan Carlos Salas
Juan David Rayo
Juan Ignacio Guzmán
Juan Somavia
Karla Lorenzo
Katherine Ferrada
Leandro Voisin
Leonel Sierralta
Leopoldo Gutiérrez
Lohengrim Cavieres
Lorena Cornejo
Lorena Ramírez
Lorna Guerrero
Luis Felipe Oliva
Luis Magne
Luis Morán
Magdalena Fernández
Manuel Contreras
Marcela Angulo
Marcela Bocchetto
Marcela Paiva
Marcelo Valdebenito
Marco Vaccarezza
Marcos Lima
María Cecilia Hernández
María Cristina Betancour
María Fernanda Valdivieso
María Luisa Lozano
Mariana Concha
Martha Hengst
Mauricio López
Mauricio Pradena
Myriam Elmes

Nicolás Jubera
Nicolás Winter
Orlando Jiménez
Oscar Benavente
Osvaldo Urzúa
Pablo Marquet
Pamela Chávez
Patricio Lillo
Petar Ostojic
Priscilla Ulloa
René Aguilar
René Rojas Guerrero
Ricardo Lizana
Ricardo Schlack
Roberto Parra
Roberto Parra Figueroa
Rodolfo Camacho
Rodrigo Moya
Rodrigo Valenzuela
Sandra Briceño
Santiago Montt
Sebastián Avilés
Trinidad Lecaros
Ulrike Broschek
Vanessa Maynou
Vania Ramírez
Varinka Farren
Víctor Aguilera
Víctor Pérez
Willy Kracht

Y a todas las personas que hicieron posible la elaboración de este material y que contribuyeron en el debate durante este proceso.

