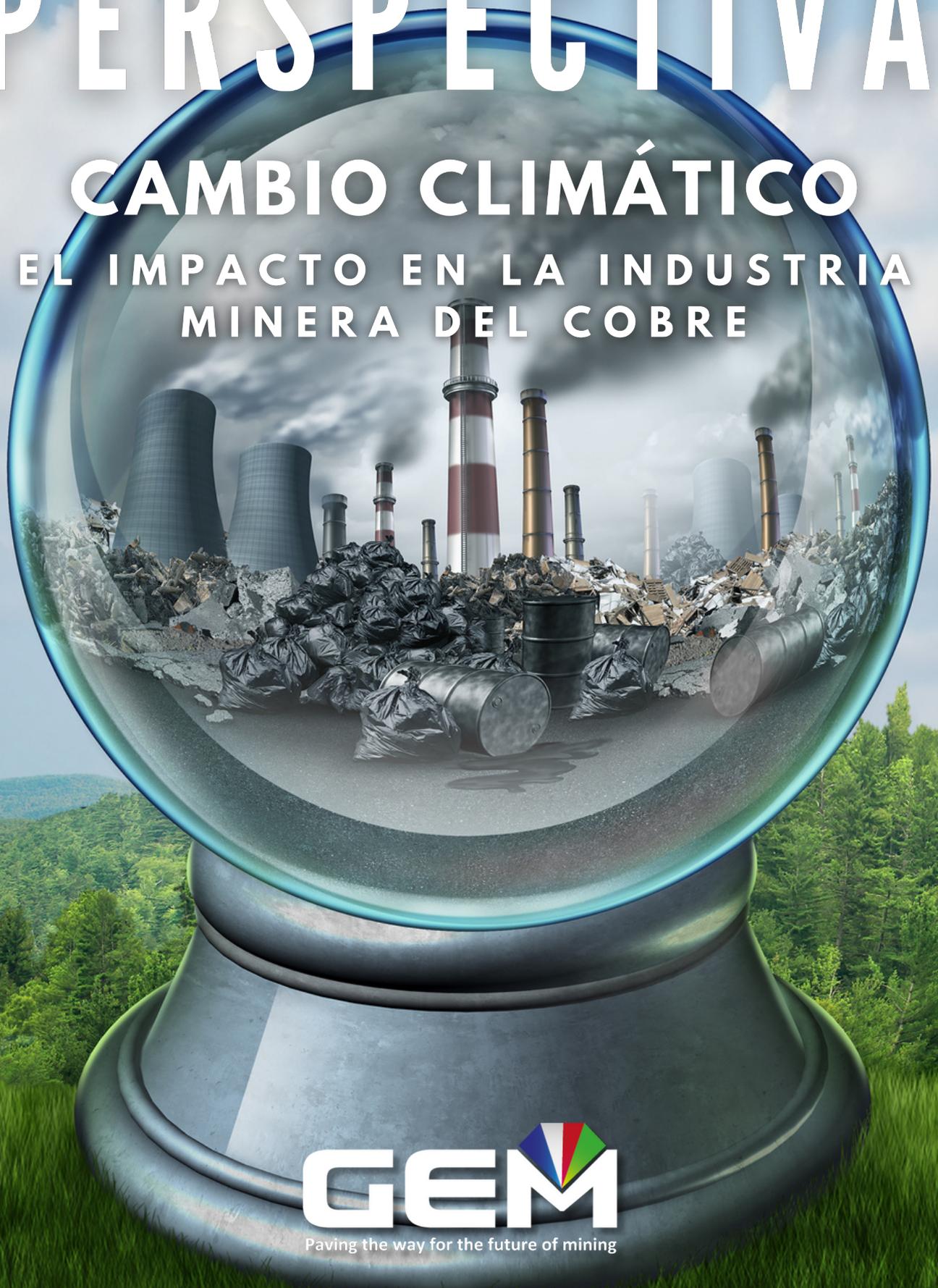


| VOL. 1 | MARZO 2024 |

# PERSPECTIVA

## CAMBIO CLIMÁTICO

EL IMPACTO EN LA INDUSTRIA  
MINERA DEL COBRE



**GEM**

Paving the way for the future of mining

# ÍNDICE

Sobre GEM.....	3
Editorial.....	4
Introducción.....	5
Antecedentes.....	7
Minerales extraídos año 2022.....	8
Cambio climático y minería del cobre.....	9
Cumplimiento de las normas medioambientales en la minería del cobre.....	14
Casos de estudio.....	17
Perspectivas de futuro, retos y oportunidades.....	20
Perspectiva económica.....	21
Conclusiones.....	22
Bibliografía.....	23
Contacto.....	24
Clientes.....	25



# SOBRE GEM

Somos una empresa de Ingeniería Industrial especializada en brindar apoyo a la industria minera en asuntos relacionados con gestión y economía. Nuestra experiencia abarca diversos campos, mientras desarrollamos las herramientas más avanzadas aplicadas en el ámbito minero. Con más de 14 años de experiencia y la exitosa implementación de más de 400 proyectos a nivel mundial, nos destacamos por nuestra sólida trayectoria y compromiso con la excelencia en el sector.

## MISIÓN

Somos una empresa proveedora de productos y servicios de ingeniería industrial que permiten habilitar el camino para la minería del futuro, a la vez que maximizan el valor del negocio de nuestros clientes

En GEM estamos comprometidos a convertirnos en un faro para la industria minera mundial.



# EDITORIAL

Transformación necesaria de la minería del cobre ante el desafío del cambio climático.

En el escenario actual, marcado por la creciente urgencia del cambio climático, la industria minera del cobre se encuentra en una encrucijada crítica que exige una profunda reflexión y acciones decisivas. Este informe aborda de manera integral la intersección entre la minería del cobre y los desafíos ambientales, explorando tanto las amenazas como las oportunidades en este contexto.

La minería del cobre, esencial para diversas industrias, ha estado tradicionalmente asociada con impactos ambientales significativos. La extracción y procesamiento de este metal han sido responsables de emisiones de gases de efecto invernadero, deforestación y alteraciones en los ecosistemas locales. En un momento en que la comunidad global reconoce la necesidad imperativa de abordar el cambio climático, la industria minera del cobre está bajo una presión sin precedentes para evolucionar hacia prácticas más sostenibles.

Este editorial busca no solo resaltar los desafíos ambientales que enfrenta la industria, sino también proponer un enfoque positivo hacia la transformación. La tecnología y la innovación desempeñan un papel crucial en esta evolución. Desde el desarrollo de métodos de extracción más eficientes hasta la implementación de procesos de producción más sostenibles, la industria minera del cobre tiene la oportunidad de liderar el camino hacia una minería con un impacto negativo reducido en el cambio climático.

Las empresas mineras de cobre tienen la oportunidad no solo de reducir su huella ambiental, sino también de contribuir al desarrollo de comunidades locales y promover prácticas justas y éticas.



En conclusión, la industria minera del cobre se encuentra en un momento crucial, donde las decisiones tomadas en este momento tendrán un impacto significativo en la industria del mañana. Este editorial aboga por una visión audaz y un compromiso firme con la sostenibilidad, no solo como respuesta a las demandas actuales, sino como una inversión en un futuro donde la minería del cobre y el medio ambiente puedan coexistir armónicamente.

# INTRODUCCIÓN

Según el IPCC (2023), el concepto de cambio climático se basa en el entendimiento de que las actividades humanas, principalmente las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), han provocado indiscutiblemente el calentamiento global. Este calentamiento se evidencia en un aumento de 1.1 [°C] de la temperatura global en superficie desde el periodo preindustrial (1850-1900) hasta la década 2011-2020. El aumento de la temperatura es más pronunciado sobre la tierra (1.59 [°C]) que sobre el océano (0.88 [°C]), y las dos primeras décadas del siglo XXI experimentaron un aumento de 0.99 [°C] en comparación con el periodo de referencia (IPCC, 2023).

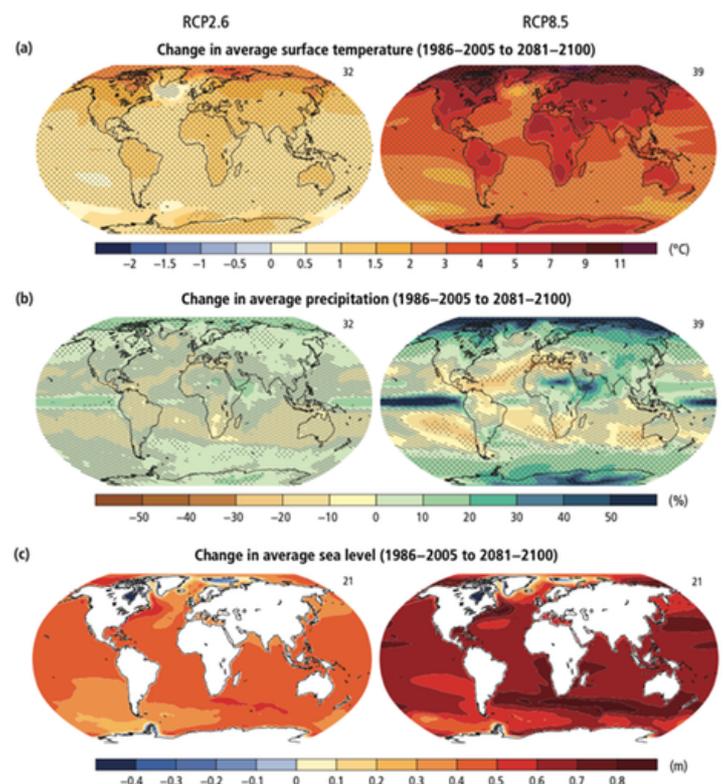
A falta de un modelo singular de cambio climático, se utilizan varios escenarios para captar las complejidades e incertidumbres asociadas a los futuros resultados del cambio climático. En este sentido, las Vías de Concentración Representativas (VCR) abarcan diversos escenarios de calentamiento global mediante la modelización de las futuras concentraciones de GEI y contaminantes asociados resultantes de las actividades humanas.

La **Figura 1** representa la diferencia entre el RCP2.6, el mejor escenario para limitar el cambio climático antropogénico, y el RCP8.5, el peor escenario con un rápido crecimiento de las emisiones, especialmente durante la primera mitad del siglo.

Los RCP proporcionan valores numéricos para las cantidades futuras de GEI y el forzamiento radiactivo asociado, que representa la energía extra absorbida por el sistema terrestre debido al aumento de la contaminación causante del cambio climático. Los escenarios oscilan entre el RCP2.6 (emisiones más bajas) y el RCP8.5 (emisiones más altas).

El RCP8.5 es el escenario preferible y exigido por las autoridades medioambientales a las industrias, incluida la minera, para un análisis de riesgos sólido. Prevé impactos climáticos más graves, como el aumento de las temperaturas (alrededor de 3.7 [°C]), la subida del nivel del mar (alrededor de 0.63 [m]), fenómenos meteorológicos extremos y otros cambios medioambientales que afectan significativamente a las operaciones y la producción mineras. El RCP8.5 ofrece una visión de un futuro con una mitigación climática mínima y ayuda a comprender los peores escenarios climáticos. Ayuda a evaluar los posibles retos y vulnerabilidades relacionados con el clima.

**FIGURA 1. FUTUROS CLIMÁTICOS CONTRAPUESTOS: ESCENARIOS RCP2.6 VS. RCP8.5**



Fuente: IPCC (2014)

En el panorama industrial, la innegable realidad del cambio climático subraya el imperativo de unas prácticas responsables y sostenibles. El calentamiento global inducido por el hombre, impulsado principalmente por las actividades industriales, ha provocado alteraciones significativas en la atmósfera, los océanos y los ecosistemas. La subida del nivel del mar y la intensificación de los fenómenos meteorológicos extremos plantean retos a las industrias de todo el mundo.

Por lo tanto, la minería, como actividad antropogénica significativa, desempeña un papel en el cambio climático a través de sus contribuciones a las emisiones de GEI y a la alteración del medio ambiente. La extracción y el tratamiento de minerales suelen ir asociados a la combustión de combustibles fósiles y, en consecuencia, a la liberación de dióxido de carbono, así como de otros contaminantes, lo que contribuye a la huella de carbono global.

Las empresas mineras deben abordar su huella medioambiental y adoptar prácticas sostenibles para mitigar su contribución al calentamiento global.

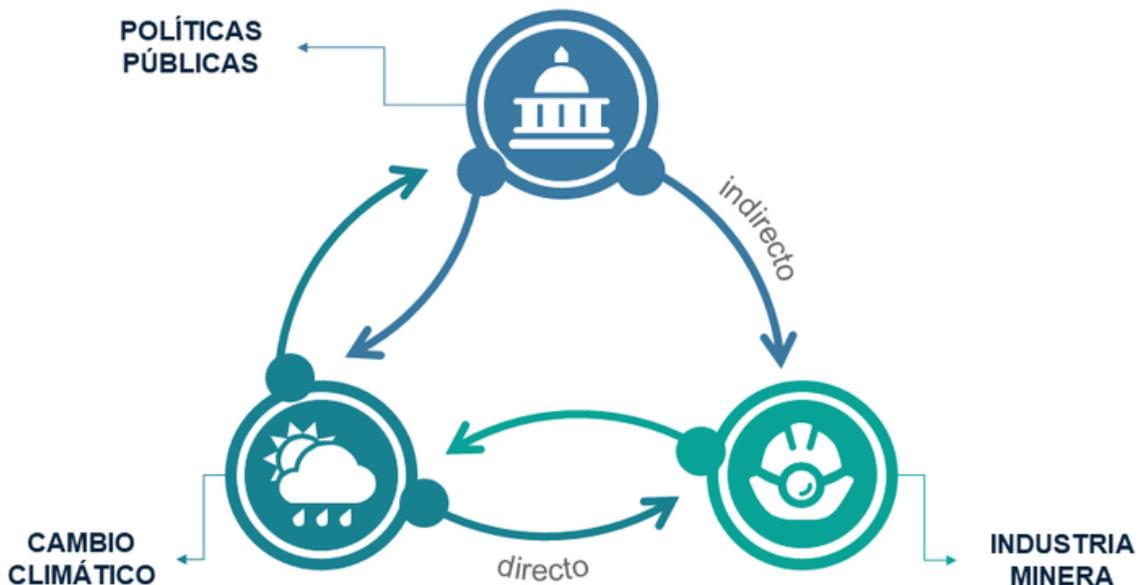
Sin embargo, es crucial reconocer que el cambio climático también plantea riesgos sustanciales para la industria minera, tanto de forma directa como indirecta. El impacto indirecto se manifiesta a través de las implicaciones de las políticas públicas, como los mecanismos de fijación de precios del carbono, los cánones y regalías mineras, los reglamentos y normas sobre emisiones, las políticas de uso y conservación del suelo, los reglamentos sobre el uso del agua y los costes de los seguros, entre otros (véase **Figura 2**).

**El objetivo de este informe es evaluar la vulnerabilidad de la industria minera ante los crecientes peligros asociados al cambio climático.**

**Pretende examinar los riesgos y retos potenciales que plantean las cambiantes condiciones climáticas, reforzando la necesidad de adoptar medidas proactivas para adaptarse al cambiante panorama climático.**

**Se sugiere que descuidar el impacto del cambio climático en la minería podría conducir a un aumento de las vulnerabilidades y a importantes retos operativos y financieros.**

**FIGURA 2. RELACIÓN ENTRE EL CAMBIO CLIMÁTICO E INDUSTRIA MINERA**



*Fuente: Elaboración propia*

# ANTECEDENTES

## Cobre, piedra angular

El **cobre**, piedra angular entre los metales extraídos en todo el mundo, desempeña un papel fundamental en diversas industrias (véase la **Figura 3**). Su versatilidad en la electrónica, la construcción y las energías renovables pone de relieve su carácter indispensable. Como líder en conductividad y durabilidad, el cobre sigue impulsando la innovación y el progreso sostenible, lo que lo convierte en un componente esencial de nuestro mundo interconectado y en rápida evolución.

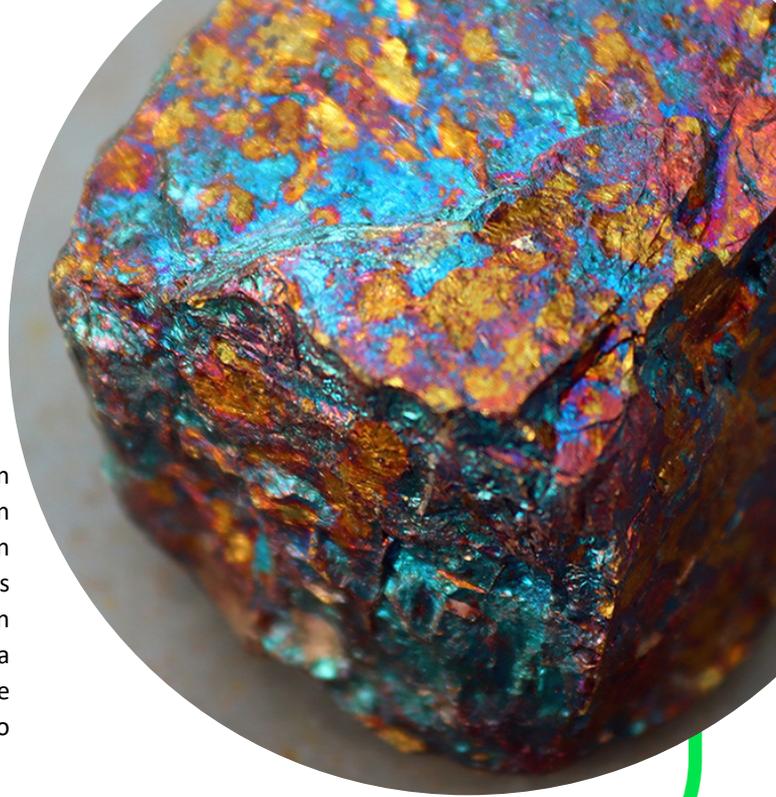
## El Cobre es extraído en todo el mundo

El cobre se extrae en todo el mundo. Chile, como líder histórico, alberga importantes minas como Chuquibambilla y El Teniente, explotadas por Codelco, el mayor productor mundial, o la enorme mina Escondida, explotada por BHP Billiton (Mining.com, 25 de mayo de 2023; Statista, 23 de noviembre de 2023). Perú, con minas como Cerro Verde o la mina de cobre-zinc Antamina (BHP Billiton), la República Democrática del Congo (Glencore), y gigantes mineros como China (Zijin Mining Group), también contribuyen significativamente. Otros productores destacados son Estados Unidos e Indonesia (Freeport-McMoRan), Rusia (Norilsk Nickel), Australia (Glencore), Zambia (First Quantum Minerals), México (Grupo México) y Kazajstán (Kazakhmys, Kazminerals).

## Gran producción a nivel mundial

Los métodos de producción de cobre varían: en Chile es habitual la minería a cielo abierto, en otros la minería subterránea, como la de El Teniente, y en algunas explotaciones la lixiviación en pilas.

Dada la enorme producción mundial, la industria minera del cobre deja una huella medioambiental y social considerable. La escala de las operaciones, desde la extracción hasta el procesamiento, tiene implicaciones de gran alcance: alteración del suelo y uso del agua, intensidad energética, generación de residuos, alteración del hábitat, comunidad y aspectos sociales.



# MINERALES EXTRAÍDOS EN EL AÑO 2022

El mundo produjo alrededor de 2.8 billones de toneladas de metales en el año 2022.



## Metales versus Minerales

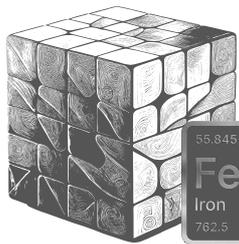
### Minerales

Son naturalmente piedras que contienen metales o metales compuestos

### Metales

Son las partes valiosas que pueden ser extraídas y vendidas

185.111.835 Toneladas de minerales industriales



2.600.000.000 Toneladas de hierro



69 M Aluminio



41 M Cromo



22 M Cobre



20 M Manganese



13 M Zinc



9,5 M Titanio



4,5 M Plomo



3,3 M Niquel



1,4 M Circon



1 M Magnesio



340 K Estroncio



49 K Uranio



20 K Bismuto



2,2 K Mercurio



280 Berilio

## Tecnología y metales preciosos 1.500.008 toneladas



310K Estaño



300K Oxido tierras raras



250K Molibdeno



190K Cobalto



130K Litio



100 K Vanadio



84K Tungsteno



79K Niobio



26K Plata



24K Cadmio



3,1K Oro



2K Tantalio



900 Indio



550 Galio



400 Grupo metales Platino



58 Renio

## Uso principal

- Producción acero
- Agentes aleación
- Construcción
- Imanes
- Productos químicos
- Electrónicos
- Energía / baterías
- Otros

Mineral utilizable: 2.600.000.000 toneladas  
Contenido de Hierro: 1.600.000.000

Fuente: Elaboración gráfica propia en base a USGS Mineral Commodity Summaries (2023)

# CAMBIO CLIMÁTICO Y MINERÍA DEL COBRE



Como ya se ha mencionado, la industria minera, a su vez, también se enfrenta a notables impactos del cambio climático. Los cambios en los patrones meteorológicos, los fenómenos extremos y las alteraciones de los ecosistemas plantean riesgos sustanciales para las operaciones mineras. Entre ellos se incluyen interrupciones de la productividad, problemas de seguridad y desafíos en las cadenas de suministro. La industria debe hacer frente a estas vulnerabilidades y aplicar estrategias de adaptación para navegar eficazmente por el cambiante panorama climático.

Múltiples trabajos de investigación observan el impacto de los fenómenos inducidos por el cambio climático a lo largo de diferentes etapas de la minería, desde la exploración hasta el transporte, en diversa medida. Una revisión exhaustiva nos ha permitido identificar los principales fenómenos que afectan directamente a la industria, sin excluir la minería del cobre.

Así, la **Tabla 1** se ha dividido en cuatro subcategorías según la fuente de origen de los fenómenos climáticos: (a) altas temperaturas, (b) bajas temperaturas, (c) eventos hidrometeorológicos, y (d) otros peligros. Además de un breve acompañamiento resumido, cada tabla contiene una descripción detallada de los impactos causados por cada uno de los peligros climáticos enumerados y distribuidos por la zona afectada: (i) perturbaciones operativas, (ii) daños a las infraestructuras, (iii) problemas de salud y seguridad, y (iv) otras zonas.



**TABLA 1a. FENÓMENOS INDUCIDOS POR EL CAMBIO CLIMÁTICO QUE AFECTAN A LA PRODUCCIÓN Y LOS COSTES DE LA MINERÍA DEL COBRE. ALTAS TEMPERATURAS**

ÁREA DE IMPACTO	 INCENDIOS FORESTALES	 ONDAS DE CALOR	 SEQUÍA	 CAMBIOS EN LAS RANGAS GEOGRÁFICAS DE FLORA
 INTERRUPCIONES OPERATIVAS	Órdenes de evacuación y cierre de carreteras Contaminación del agua de proceso con cenizas, sedimentos y productos químicos	Cortes de energía Reducción de la disponibilidad de agua de proceso	Escasez de agua necesaria para el tratamiento del mineral. la eliminación del polvo y la refrigeración de los equipos	Inestabilidad del suelo en zonas mineras Zonas limitadas disponibles para la exploración y extracción minera
 DAÑOS A LA INFRAESTRUCTURA	Dstrucción de carreteras, líneas eléctricas y redes de comunicación	Mal funcionamiento y averías de los equipos Reducción de la productividad	Inversiones adicionales en fuentes de agua alternativas o tecnologías avanzadas de reciclado del agua	N/A
 PROBLEMAS DE SALUD Y SEGURIDAD	Riesgo de accidentes y lesiones debido a superficies resbaladizas y visibilidad reducida	Problemas cardiovasculares o enfermedades respiratorias Ampliación del hábitat de mosquitos que propagan enfermedades como la malaria, el dengue, el zika, fiebre amarilla y otras enfermedades transmitidas por vectores	Enfermedades respiratorias Enfermedades relacionadas con el polvo, como la silicosis	Adaptación a nuevos emplazamientos y recibir información adecuada para reconocer y proteger las especies Algunas de las especies vegetales pueden ser tóxicas
 OTRAS ÁREAS	Erosión del suelo y la contaminación del agua provocan normas medioambientales más estrictas	La sequía durante las olas de calor aumenta el riesgo de incendios forestales	Normativa medioambiental más estricta sobre el uso y conservación del agua	Directrices y normativas más estrictas para proteger las especies vegetales recién identificadas, que exigen ajustes en las prácticas mineras

**Fuente:** Agrawala et al. (2010); Chavala (2016); Ford et al. (2010); Gasbarro & Pinkse (2016); Ghadge et al. (2019); Goldstein et al. (2019); Mason et al. (2013); Rüttinger et al. (2020); Simpson et al. (2021)

La **Tabla 1a** presenta los fenómenos inducidos por el cambio climático causados por temperaturas extremadamente altas, normalmente acompañadas de bajos niveles de precipitaciones: incendios forestales, olas de calor, sequías y cambios en la distribución geográfica de la flora.

El aumento de las temperaturas plantea retos operativos en la minería del cobre. El aumento del calor puede sobrecargar los equipos y la maquinaria, provocando posibles averías. Además, pueden necesitarse recursos adicionales para los sistemas de refrigeración, lo que afecta a la eficiencia operativa general.

El cambio climático agrava los problemas de escasez de agua, cruciales para los procesos de la minería del cobre. El aumento de las temperaturas contribuye a reducir la disponibilidad de agua, lo que repercute en el procesamiento del mineral, la supresión del polvo y la refrigeración de los equipos. Esto puede dar lugar a una disminución de los niveles de producción y a una mayor competencia por los recursos hídricos.

Las temperaturas elevadas contribuyen a la vulnerabilidad de las infraestructuras críticas en las zonas de minería del cobre. Las carreteras, las líneas eléctricas y otros componentes pueden sufrir un desgaste acelerado y necesitar un mantenimiento y una reparación más.

**TABLA 1b. FENÓMENOS INDUCIDOS POR EL CAMBIO CLIMÁTICO QUE AFECTAN A LA PRODUCCIÓN Y LOS COSTOS DE LA MINERÍA DEL COBRE. BAJAS TEMPERATURAS**

ÁREA DE IMPACTO	 NIEVE EXTREMA	 TORMENTA DE GRANIZO	 FRÍO EXTREMO	 DESHIELO GLACIAR
 INTERRUPCIONES OPERATIVAS	Obstrucción de carreteras Cortes de electricidad	Destrucción de instalaciones mineras, edificios y almacenes Reparaciones e inspecciones indeseables	Reparaciones costosas y tiempos de inactividad provocados por la congelación de los conductos de combustible y averías en los motores Problemas de procesamiento del mineral, control del polvo causado por la congelación de agua	Reducción del volumen de los glaciares altera la disponibilidad de agua, lo que provoca escasez de agua durante las estaciones secas
 DAÑOS A LA INFRAESTRUCTURA	Destrucción de equipos Derrumbamiento de tejados de minas, cobertizos o almacenes	Daños sustanciales en equipos mineros, vehículos, infraestructuras e instalaciones Retraso en la sustitución de las piezas dañadas	Congelamiento de maquinaria, vehículos y sistemas hidráulicos Daños en tuberías, cintas transportadoras e instalaciones Estructuras metálicas que se vuelven quebradizas	Mayores cargas de sedimentos en los ríos cercanos, lo que repercute en la calidad del agua y aumenta el desgaste de los equipos de minería y procesamiento Erosión de carreteras y puentes
 PROBLEMAS DE SALUD Y SEGURIDAD	Riesgo de accidentes y lesiones debido a superficies resbaladizas y visibilidad reducida	Lesiones directas Condiciones de trabajo peligrosas debido a superficies resbaladizas que aumentan el riesgo de tropezos y caídas	Hipotermia y congelación Explosión prolongada que provoca entumecimiento, disminución de la destreza, en casos graves daños en tejidos Horas de trabajo reducidas y productividad ralentizada	Inundaciones repentinas y crecidas que plantean riesgos inmediatos para quienes trabajan en zonas bajas
 OTRAS ÁREAS	Retraso en la entrega de materiales esenciales y piezas de repuesto	N/A	Inversiones adicionales necesarias en equipos, infraestructuras y formación específica para los climas fríos	Los cambios en patrones de deshielo de los glaciares pueden requerir ajustes en la normativa medioambiental

**Fuente:** Agrawala et al. (2010); Ford et al. (2010); Gashbarn & Pinkse (2016); Ghadge et al. (2019); Klein et al. (2022); Loechel et al. (2013); Mavrommatis & Damigos (2020)

Las olas de calor sobrecargan las redes eléctricas y pueden provocar cortes. Dado el alto consumo energético de la industria, las interrupciones del suministro eléctrico pueden afectar a los programas de producción y aumentar los costes operativos.

Por último, las altas temperaturas suponen un riesgo para la salud de los trabajadores mineros y afectan a su productividad y bienestar. El estrés térmico, la deshidratación, la fatiga y las enfermedades transmitidas por mosquitos aumentan el riesgo de accidentes.

La **Tabla 1b** contiene la información sobre el efecto causado por las bajas temperaturas a la industria minera del cobre: nieve extrema, granizo, frío extremo y deshielo glaciar. Los trastornos operativos que pueden surgir con el frío y las precipitaciones en forma de nieve y granizo se asocian principalmente a la limitación del acceso al emplazamiento minero para el personal, los equipos y los suministros, así como a los cortes de electricidad.

Además, la nieve y el hielo pueden afectar a la eficiencia de la vida útil de los equipos mineros. Todo ello puede paralizar las operaciones durante un tiempo tangible hasta que lleguen las piezas de repuesto y se realicen todas las reparaciones necesarias.

En tales condiciones, además del riesgo evidente de hipotermia y, en general, de condiciones de trabajo peligrosas, los trabajadores mineros están expuestos a perturbaciones más específicas. La necesidad de llevar equipos de protección individual (EPI) voluminosos y abrigados provoca una reducción de las horas de trabajo y de la productividad, ralentizando el proceso de trabajo.

## CUADRO 1c. FENÓMENOS INDUCIDOS POR EL CAMBIO CLIMÁTICO QUE AFECTAN A LA PRODUCCIÓN Y LOS COSTES DE LA MINERÍA DEL COBRE. EVENTOS HIDROMETEOROLÓGICOS

ÁREA DE IMPACTO	INUNDACIONES	AUMENTO DEL NIVEL DEL MAR	MAREJADAS	ACIDIFICACIÓN OCEÁNICA
 <b>INTERRUPCIONES OPERATIVAS</b>	Sumersión de la maquinaria, los equipos y vías de acceso, lo que provoca la paralización de la producción Contaminación del yacimiento minero, con escombros y químicos	Riesgo de inundaciones en explotaciones mineras situadas en regiones costeras Intrusión de agua salada en fuentes de agua dulce, afectando a la calidad del agua necesaria para el procesamiento y otras actividades	Dificultades con carga o descarga de materiales, el funcionamiento de buques marítimos o realización de actividades mineras en alta mar que paralizan temporalmente las operaciones	N/A
 <b>DAÑOS A LA INFRAESTRUCTURA</b>	Destrucción de minas, plantas de procesamiento, instalaciones de almacenamiento y sistemas de transporte	Riesgo de destrucción de infraestructuras críticas: plantas de transformación, instalaciones de almacenamiento, rutas de transporte	Riesgo de daño en las infraestructuras costeras; espigones, muelles, que provoquen erosión y daños estructurales	El agua de mar ácida puede acelerar la corrosión de estructuras y equipos metálicos utilizados en entornos marinos
 <b>PROBLEMAS DE SALUD Y SEGURIDAD</b>	El aumento del nivel del mar atrapa a los trabajadores bajo tierra Estabilidad de las estructuras mineras comprometida Enfermedades transmitidas por agua e hipotermia	Enfermedades transmitidas por el agua, infecciones cutáneas y problemas respiratorios Riesgo de inundaciones y otros incidentes	Condiciones de trabajo inestables, creando alto riesgo de accidentes, lesiones y mareos Riesgo caídas, tensión física y agotamiento mental	N/A
 <b>OTRAS ÁREAS</b>	Destrucción de minas, plantas de procesamiento, instalaciones de almacenamiento y sistemas de transporte	Reglamentos y normas medioambientales estrictos para explotaciones mineras situadas en zonas costeras vulnerables	Inversiones adicionales necesarias en sistemas avanzados de vigilancia meteorológica para planificar las operaciones en consecuencia	Normativas medioambientales más estrictas que obligan a las empresas mineras a cumplir normas más estrictas minimizando el impacto medioambiental

Fuente: Agrawala et al. (2010); Chavalala (2016); Ford et al. (2010); Gasbarro & Pinkse (2016); Ghadge et al. (2019); Janson et al. (2020); Loechel et al. (2013); Mason et al. (2013); Sharma & Franks (2013)

El cuadro 1c contiene los efectos de los fenómenos hidrometeorológicos, como las inundaciones, la subida del nivel del mar, las marejadas y la acidificación de los océanos. Estos fenómenos climáticos tienen graves consecuencias para la industria del cobre, provocando interrupciones operativas, afectando a la estabilidad de las infraestructuras y paralizando la producción, así como retrasos logísticos temporales y mayores costes de mantenimiento.

En condiciones húmedas y con riesgo de infiltración de agua de mar, la maquinaria y los equipos mineros están sujetos a efectos perjudiciales, lo que es especialmente relevante para las operaciones realizadas en zonas costeras y bajas.

La naturaleza corrosiva del agua de mar acelera el deterioro de los componentes metálicos de los equipos mineros, reduciendo su eficacia operativa y su vida útil. Los sistemas de control eléctrico son susceptibles a la corrosión, lo que provoca fallos de funcionamiento. Los sistemas de gestión del agua, incluidas bombas y tuberías, sufren un mayor desgaste y requieren un mantenimiento más frecuente.

Las condiciones de trabajo inestables e impredecibles, además del creciente riesgo de contraer enfermedades transmitidas por el agua, pueden provocar tensión física y agotamiento mental.

**TABLA 1d. FENÓMENOS INDUCIDOS POR EL CAMBIO CLIMÁTICO QUE AFECTAN A LA PRODUCCIÓN Y LOS COSTES DE LA MINERÍA DEL COBRE. OTROS RIESGOS CLIMÁTICOS**

ÁREA DE IMPACTO	 NIEBLA / NEBLINA	 DESLIZAMIENTOS INDUCIDOS POR LLUVIA	 CICLONES TROPICALES	 DESCONGELAMIENTO DEL PERMAFROST
 INTERRUPCIONES OPERATIVAS	Visibilidad limitada que dificulta el manejo seguro de maquinaria pesada y la navegación dentro de la mina Interrupción de las rutas de transporte limita el acceso a la mina	Bloqueo de las vías de acceso, daños a los equipos e interrupción de las operaciones mineras Bloqueo de rutas de transporte	Cortes de electricidad, inundaciones e infraestructuras dañadas Inundación de las explotaciones mineras, lo que complica el acceso de la maquinaria y su funcionamiento	Inestabilidad del suelo que provoca hundimientos y socavones Interrupción de la infraestructura minera (carreteras, cimientos y tuberías)
 DAÑOS A LA INFRAESTRUCTURA	Penetración de humedad en los sistemas eléctricos y la maquinaria, lo que provoca fallos y averías en los equipos	Daños en infraestructuras mineras cruciales (cintas transportadoras, instalaciones de almacenamiento y plantas de procesamiento)	Daños y destrucción de los edificios, carreteras, puentes y equipos	Construcción en terrenos inestables que requieren costosas soluciones de ingeniería para garantizar la estabilidad de las estructuras
 PROBLEMAS DE SALUD Y SEGURIDAD	Problemas respiratorios Riesgo de resbalones y caídas debido a superficies húmedas y resbaladizas	Riesgo inmediato de lesiones y muertes para quienes trabajan en la zona afectada o cerca de ella Los trabajadores que participan en las labores de rescate y limpieza están expuestos a materiales peligrosos	Peligro de caída de escombros, derrumbes estructurales e inundaciones El agua estancada puede convertirse en caldo de cultivo de enfermedades transmitidas por el agua, infecciones cutáneas y problemas respiratorios	Condiciones de trabajo peligrosas debido a hundimientos repentinos del suelo, socavones y corrimientos de tierra El aumento de la humedad crea caldos de cultivo para los insectos, lo que incrementa el riesgo de enfermedades
 OTRAS ÁREAS	N/A	Erosión del suelo, sedimentación de masas de agua que afectan a la calidad del agua y a los ecosistemas acuáticos y dan lugar a normativas más estrictas y a un mayor escrutinio	Erosión del suelo, corrimientos de tierras y contaminación del agua causados por la escorrentía de las explotaciones mineras Daños medioambientales que dan lugar a inspecciones y multas	Alteración de los patrones naturales de drenaje, lo que provoca un aumento de la infiltración de agua e inundaciones en el emplazamiento de la mina

*Fuente: Agrawala et al. (2010); Chavalala (2016); Ford et al. (2010); Gasbarro & Pinkse (2016); Ghadge et al. (2019); Janson et al. (2020); Loechel et al. (2013); Mason et al. (2013); Sharma & Franks (2013)*

La **Tabla 1d** recopila todos los riesgos climáticos restantes examinados: niebla/niebla, deslizamientos de tierra inducidos por la lluvia, ciclones tropicales y deshielo del permafrost.

Al igual que en los casos anteriores observados, la aparición de estos fenómenos se traduce en una visibilidad limitada en el emplazamiento de la mina, interrupciones en las rutas de transporte, bloqueo de las vías de acceso, lo que provoca la suspensión de las actividades de explotación y producción, y retrasos en la entrega de materiales, equipos y piezas de repuesto. La estabilidad de los sistemas esenciales puede verse comprometida, lo que provoca daños estructurales y perturbaciones operativas e infraestructurales.

En cada uno de los casos de la **Tabla 1**, los trabajadores mineros que se encuentran en el epicentro de los acontecimientos están expuestos a graves amenazas físicas. Además, en condiciones extremas, también se ven obligados a asumir una carga de trabajo y una responsabilidad adicionales, sometiéndose a formaciones especiales, haciendo frente a las consecuencias de las catástrofes climáticas y participando en operaciones de rescate.

Esto les impone un agotamiento físico y una tensión mental adicionales.

Por último, todos los fenómenos de cambio climático observados pueden dar lugar a la introducción de normativas medioambientales más estrictas. Los gobiernos y los organismos reguladores pueden imponer medidas sobre el uso del agua, las emisiones y las prácticas mineras sostenibles. Además, la preocupación por el cambio climático y el giro mundial hacia la sostenibilidad pueden influir en la dinámica del mercado del cobre. Las partes interesadas tienen cada vez más en cuenta la responsabilidad medioambiental y social, lo que repercute en la reputación de la industria y en su acceso al mercado.

Se supone que las perturbaciones operativas y los daños a las infraestructuras conllevan una mayor proporción de riesgos financieros, mientras que el ámbito de la salud y la seguridad puede asociarse tanto a pérdidas financieras como humanas.

Por lo tanto, desde las interrupciones operativas y el aumento de los costes hasta la volatilidad del mercado y las presiones normativas, navegar por las complejidades del cambio climático es esencial para la sostenibilidad a largo plazo y la resistencia económica de la industria.

# CUMPLIMIENTO DE LAS NORMAS MEDIOAMBIENTALES EN LA MINERÍA DEL COBRE

Como ya se ha señalado, la evolución de las normativas y políticas climáticas afecta significativamente a la industria de la minería del cobre. El cumplimiento de los nuevos reglamentos y normas emergentes es asumido por las empresas no sólo como un nuevo requisito global, sino también como un componente crítico para fines estratégicos y de marketing.

Además de crear un sistema de gestión de riesgos que responda a las cuestiones relacionadas con el cambio climático y la preservación de la biodiversidad, las empresas mineras del cobre se esfuerzan por obtener ventajas competitivas haciéndose más atractivas para la inversión.

Al incorporar las prioridades medioambientales globales, dictadas por diversas asociaciones de gestión del rendimiento, tanto generales como relacionadas con la minería, las empresas se centran principalmente en cuestiones de descarbonización, salud y seguridad, y cambio climático. Para saber más sobre los principales compromisos relacionados con el clima en la industria minera del cobre, véase el informe "GEM Perspectiva" (junio de 2023).

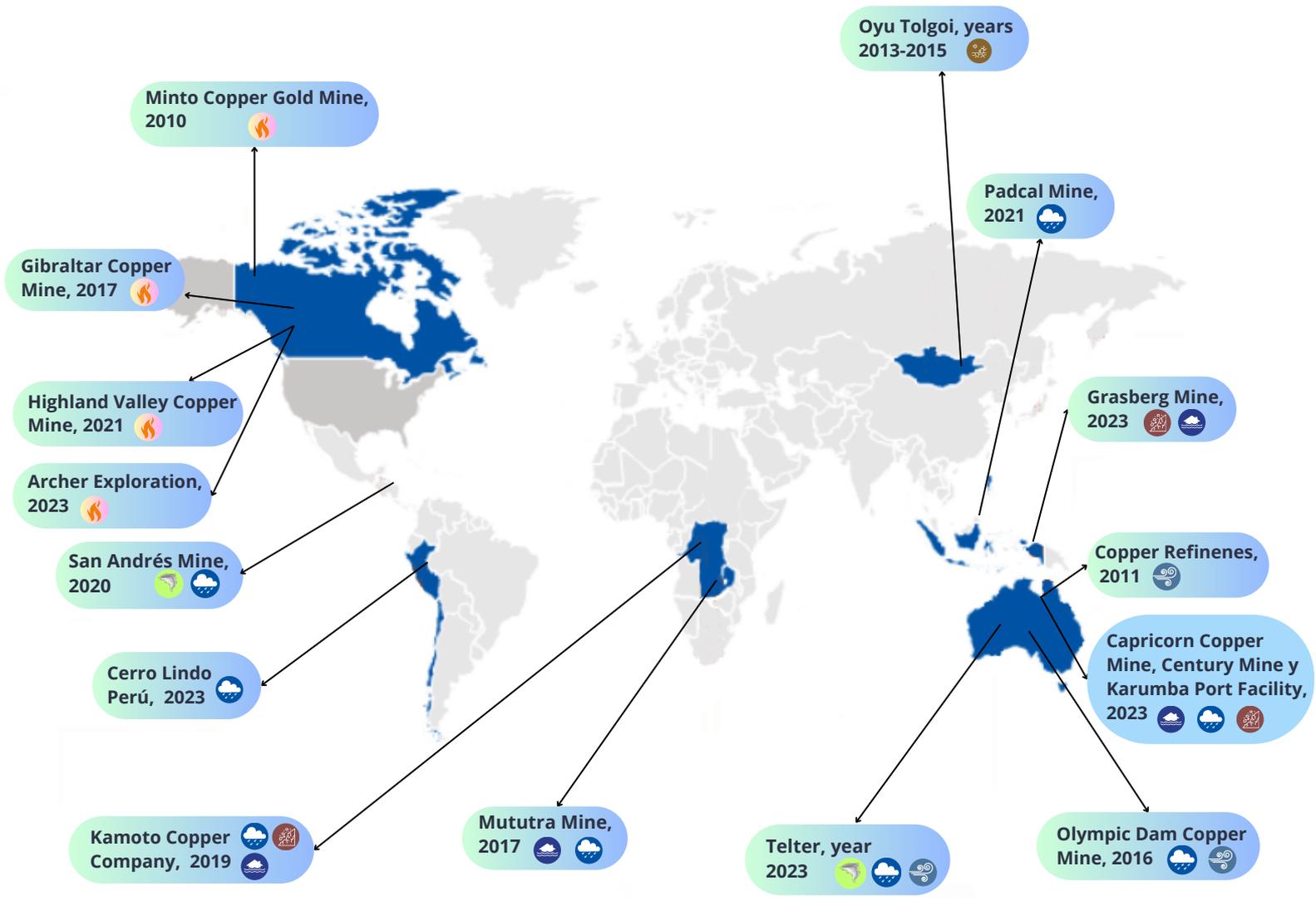
Además, múltiples estudios afirman que "aunque el sector minero percibe el cambio climático como una amenaza para sus actividades, no ha invertido los recursos necesarios para adaptarse al clima futuro" (Mavrommatis & Damigos, 2020). También se subraya que "no tener en cuenta el cambio climático y los fenómenos meteorológicos extremos puede tener consecuencias graves, costosas y de gran alcance", para las que muchas empresas no parecen estar preparadas (Klein et al., 2022).

A este respecto, **las Figuras 4 y 5** presentan la observación de los fenómenos inducidos por el cambio climático que han sacudido significativamente a los países y empresas mineras del cobre en las dos últimas décadas. Evidentemente, en la **Figura 4** el mayor número de casos se registró en las minas australianas y canadienses, que se vieron afectadas sobre todo por las fuertes lluvias y los peligros que las acompañaron, como inundaciones y corrimientos de tierras, así como incendios forestales, respectivamente.

**Sin embargo, a pesar de que las empresas mineras están trabajando duro en el establecimiento de objetivos adecuados a medio y largo plazo para cumplir con la nueva realidad, la falta de una estrategia única y una comprensión clara de los componentes medioambientales y de minería sostenible corre el riesgo de ralentizar la transición de la planificación a las acciones reales.**



**FIGURA 4. IMPACTO GLOBAL: EVENTOS INDUCIDOS POR EL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA INDUSTRIA MINERA DEL COBRE DESDE 2010**



**Leyenda**

- |  |   |
|--|---|
|  Sequía                   |  Ciclones          |
|  Lluvia                   |  Tormenta de nieve |
|  Inundaciones             |  Huracanes         |
|  Tormenta                 |  Incendios         |
|  Deslizamientos de tierra |   |

Fuente: Elaboración propia

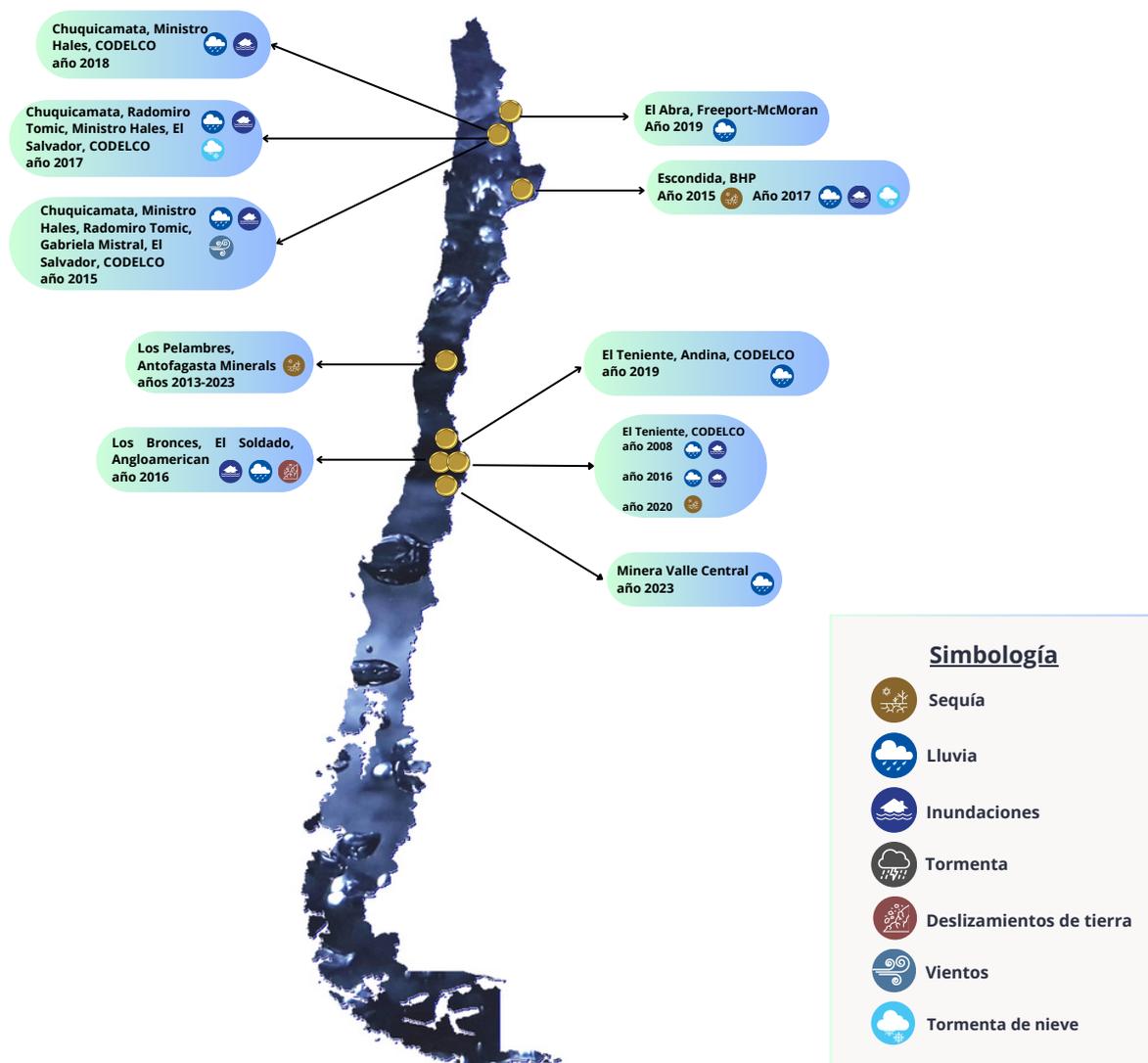
Mientras tanto, Chile, como se ve en la **Figura 5**, siendo el mayor productor de cobre del mundo y dependiendo en gran medida de la minería a cielo abierto, también se enfrenta a vulnerabilidades notables en el contexto del cambio climático. Sus características medioambientales únicas, la diversidad climática y las condiciones geográficas de todo el país contribuyen a la susceptibilidad de la industria a sequías, lluvias, inundaciones, corrimientos de tierra, fuertes vientos, tormentas de nieve y terremotos. Así, por ejemplo, en los últimos años, específicamente en 2016, 2017, 2019 y 2023, el país sufrió deslizamientos inducidos por lluvias, caracterizados por frentes meteorológicos, lluvias intensas, una cantidad fenomenal de precipitaciones y una isoterma de grado cero que se mantuvo en el nivel de 2,900-3,300 [m.s.n.m.].

Como consecuencia, en distintos momentos, se vieron afectados proyectos tan importantes de operadores mineros de cobre como El Teniente, Chuquicamata, Radomiro Tomic, Ministro Hales, El Salvador, Andina (Codelco), Los Bronces, El Soldado (Anglo American), Minera Escondida (BHP Billiton), El Abra (Freeport-McMoRan), y Minera Vale Central, entre otros.

Como se puede observar, incluso las empresas más grandes y avanzadas no son inmunes a las fuerzas de la naturaleza. Entre las graves consecuencias registradas, cabe citar la paralización o cierre de las operaciones, la interrupción de las rutas de transporte, el cierre de las carreteras de acceso al emplazamiento minero, los cortes de suministro eléctrico y de agua, y los riesgos para la salud y la seguridad.

Esto implicó importantes pérdidas económicas que se reflejaron en la reducción de la producción anual. Por ejemplo, en 2016 Codelco anunció la suspensión de las operaciones en su mina subterránea de larga data El Teniente, lo que anticipó una reducción de aproximadamente 5,000 [t] en la producción de cobre fino.

**FIGURA 5. CHILE: EVENTOS INDUCIDOS POR EL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA INDUSTRIA DEL COBRE DESDE 2010**



Fuente: Elaboración propia

# CASOS DE ESTUDIO

Para entender mejor el impacto de los eventos provocados por el cambio climático, sería interesante analizar de cerca algunos de ellos dentro de las operaciones mineras de cobre realizadas en Chile

## CASO 1: EVALUACIÓN DEL RIESGO DE DESLIZAMIENTO INDUCIDO POR LLUVIAS EN LA MINA DE COBRE A



### 01

**ANTECEDENTES:** El Caso 1 examina el riesgo del fenómeno aluvial en el sector de la Mina de Cobre A para asegurar sus futuras operaciones. Se ha observado que la ocurrencia de eventos aluviales ha sido un desafío sustancial para la Mina A, tanto en el pasado como en el futuro.

De acuerdo con el escenario más pesimista (RCP8.5), se ha estimado que la temperatura mínima en el área de observación podría aumentar en más de 3 [°C] para finales de siglo (por favor, consulte la Figura 6).

Un cambio climático adicional a la velocidad pronosticada conduciría a lluvias más intensas y temperaturas más altas (aumentando la isoterma cero). Cada aumento de temperatura en el área llevará a eventos con mayor intensidad, traducidos en una mayor precipitación instantánea y acumulada para cada evento. Se espera que la probabilidad de deslizamientos aumente entre un 20% y un 35% por año en 2023, entre un 35% y un 46% por año en 2038 y supere el 50% en 2075. Aparentemente, en este caso, el daño operativo y económico también aumentaría, desafiando aún más el área minera.



### 02

**RESULTADOS:** El caso de la Mina de Cobre A tuvo lugar en 2023 y se caracterizó por inundaciones mortales que destruyeron infraestructura crítica en el área de la mina, incluyendo carreteras de acceso, canales de pulpa y objetos de mantenimiento, entre otros. Se estima que el costo de reparar la infraestructura crítica equivalió a 17 [cUS\$/lb]. En general, la pérdida asociada con el evento de deslizamiento inducido por lluvias se evaluó en un 3 [%] de la producción anual de cobre.

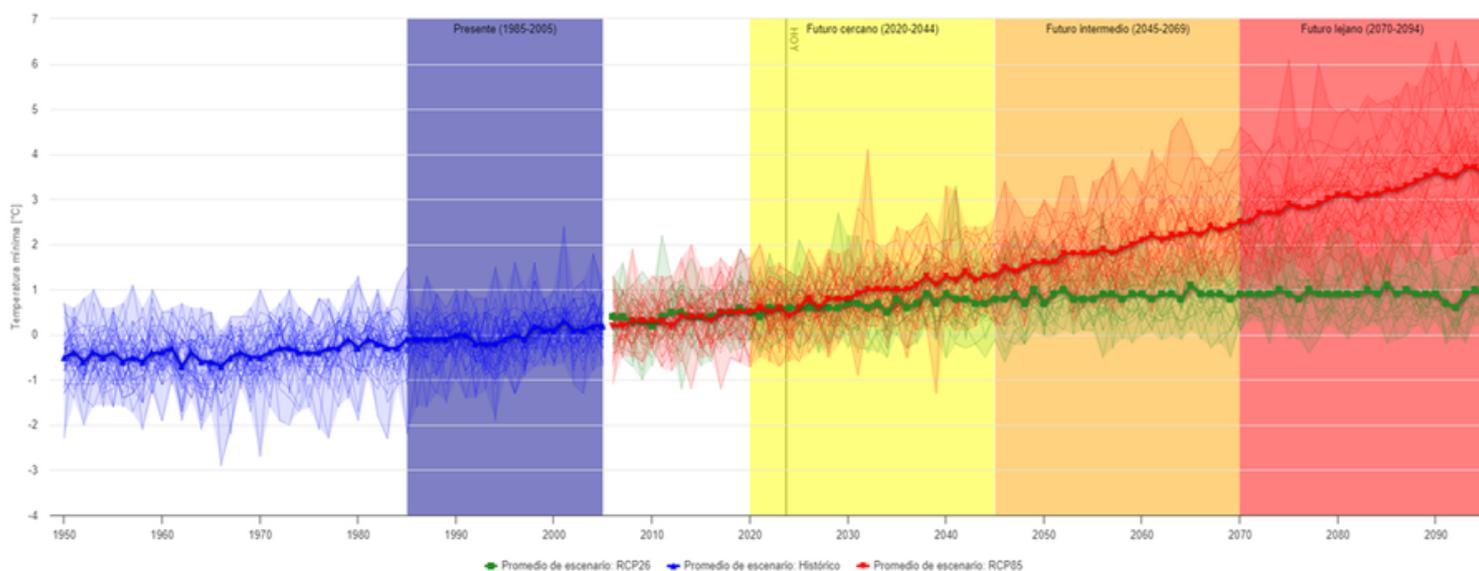
Según los modelos de cambio climático previamente discutidos, se anticipa que la probabilidad de que ocurran tales eventos aumente. Específicamente, en la zona centro-sur de Chile donde se encuentra la Mina A, las proyecciones indican un aumento de temperatura, vinculado a una isoterma de nieve en ascenso y una mayor intensidad de precipitación. En consecuencia, la creciente probabilidad de estos eventos se correlaciona con un mayor riesgo de reducción del Valor Actual Neto (VAN) para la Mina de Cobre A, atribuible tanto a la pérdida de días operativos como al aumento de los costos de reparación.



### 03

**RECOMENDACIONES:** En consecuencia, se ha recomendado implementar medidas proactivas para mitigar los riesgos futuros en la Mina de Cobre A. La construcción de barreras apropiadas sería una solución rentable en comparación con los gastos potenciales asociados con la exposición continua al riesgo. La instalación de barreras ingenieriles, como muros de contención o estructuras de estabilización de pendientes, puede reducir eficazmente la probabilidad y el impacto de los deslizamientos de tierra. Esta inversión en infraestructura preventiva no solo salvaguarda la continuidad operativa de la mina, sino que también minimiza las implicaciones financieras relacionadas con posibles interrupciones en la producción y los considerables costos de recuperación y reparación posteriores al evento, tanto a corto plazo como a largo plazo.

**FIGURA 6. PROYECCIÓN DE TEMPERATURA MÍNIMA: RCP2.6 VS. RCP8.5**



Fuente: Agrawala et al. (2010); Chavalala (2016); Ford et al. (2010); Gasbarro & Pinkse (2016); Ghadge et al. (2019); Janson et al. (2020); Loechel et al. (2013); Mason et al. (2013); Sharma & Franks (2013)

## CASO 1: EVALUACIÓN DEL IMPACTO ECONÓMICO, DE RIESGO Y DE OPCIONES DE LAS MAREJADAS EN LAS INSTALACIONES PORTUARIAS EN LA MINA DE COBRE B



01

**ANTECEDENTES:** Se realizó un análisis exhaustivo para evaluar los posibles riesgos planteados por las marejadas inducidas por el cambio climático y su impacto en las instalaciones portuarias, con un enfoque específico en el cargador de barcos en la Mina de Cobre B. Esta evaluación consideró el escenario plausible de falla del cargador de barcos como resultado de un evento crítico.

Como parte del análisis, se propone que, en caso de un incidente significativo que cause la incapacidad del cargador de barcos, el resto de las operaciones portuarias continuaría sin problemas de acuerdo con el caso comercial. Esta planificación estratégica tiene como objetivo garantizar la resiliencia de las instalaciones portuarias frente a los desafíos relacionados con el clima, fomentando la continuidad operativa y la preparación para posibles interrupciones.



02

**RESULTADOS:** Al evaluar ambas opciones para el desarrollo del escenario establecido según se muestra en la Figura 7, es evidente que el riesgo que impacta más significativamente en el caso comercial es la posible falla del cargador de barcos. Este riesgo está asociado con una disminución en las ventas de concentrado de cobre, una situación que podría agravarse si no se considera el proyecto. Sin embargo, este riesgo puede mitigarse mediante el envío eficiente de materiales al puerto.

Tras un análisis cuidadoso, se concluye que la probabilidad de falla del cargador de barcos es muy baja, estimada en no más del 1.1 [%] por año. En consecuencia, esta falla puede clasificarse como un evento poco común o, coloquialmente, una ocurrencia de "cisne negro". Esta percepción informa a los tomadores de decisiones sobre la infrecuencia de tales eventos, lo que permite una planificación informada y estratégica en el desarrollo e implementación del escenario seleccionado.



# 03

**RECOMENDACIONES:** Para mejorar la resiliencia y seguridad de las operaciones, se recomendó enfáticamente llevar a cabo una evaluación integral de la integridad estructural del cargador de barcos. Esto implica emplear análisis estructurales dinámicos para evaluar su tasa de fallos, especialmente bajo condiciones climáticas extremas como terremotos y tsunamis. Este examen exhaustivo permitirá identificar áreas vulnerables dentro de la infraestructura y facilitar la evaluación de posibles daños. Posteriormente, permitirá una evaluación estratégica de refuerzos o estructuras auxiliares para mitigar el riesgo de fallo.

Además, se aconseja mantener y, si es factible, mejorar los altos estándares de seguridad existentes. Esto se refiere no solo a los materiales utilizados en los componentes, sino también a las regulaciones que rigen su utilización. Este enfoque proactivo es crucial para minimizar la probabilidad de riesgos potenciales, especialmente en lo que respecta al riesgo de incendios en la cinta transportadora.

**FIGURA 7. EVALUACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DEL RIESGO AL VALOR DEL BCP**



Fuente: elaboración propia

# PERSPECTIVAS DE FUTURO RETOS Y OPORTUNIDADES

El futuro de la industria minera del cobre se enfrenta a un momento crucial al tener que afrontar retos y oportunidades influidos por el cambio climático. Los expertos predicen un cambio en los patrones climáticos, marcado por el aumento de las temperaturas y la intensificación de los fenómenos meteorológicos. No se trata sólo de teorías; la historia demuestra que los fenómenos meteorológicos destructivos han afectado tanto a la minería a cielo abierto como a la subterránea. **Se ha comprobado que entre los principales peligros se encuentran las lluvias torrenciales, las sequías y las olas de calor, que afectan de manera diferente a las instalaciones mineras.**

Por ejemplo, la evaluación de factores de vulnerabilidad como la topografía, el tamaño de la mina, la proximidad a centros de salud, el acceso al agua y la coordinación con las empresas cercanas reveló que las plantas de procesamiento de cobre a gran escala se enfrentan al alto riesgo climático de las sequías, y a menudo carecen de medidas de adaptación adecuadas (Del Rio et al., 2023). Henderson & Maksimainen (27 de agosto de 2020) informaron de que el estrés hídrico ya es elevado en el 30-50 [%] de las zonas de producción de cobre, oro, mineral de hierro y zinc, lo que perturbará aún más las operaciones.

Reconociendo la vulnerabilidad de la industria al cambio climático, es urgente encontrar nuevas formas de operar. Para asegurarnos de que la industria pueda continuar y prosperar, necesitamos planes inteligentes que no sólo reduzcan los riesgos de los fenómenos relacionados con el clima, sino que también aprovechen las nuevas oportunidades de crecimiento sostenible.

Es un momento crucial que requiere un enfoque proactivo y flexible para situar a la industria minera del cobre en una posición de éxito.

El objetivo de descarbonización total que se está extendiendo globalmente en la industria es también tanto el reto como la oportunidad. Para lograrlo, se requiere la plena participación de toda la cadena de valor de la minería, con opciones económicamente viables como las energías renovables y la electrificación. Se sugiere que estas modificaciones forzadas darán sus frutos. Según hemos sabido hasta ahora, algunas empresas mineras ya están invirtiendo en energías renovables, electrificando equipos y formando comités de sostenibilidad.

**La industria minera del cobre está experimentando un cambio transformador en respuesta a los retos del cambio climático.**

Las mejoras clave incluyen la adopción de plantas de desalinización para hacer frente a la escasez de agua, el compromiso con las fuentes de energía renovables y la incorporación de las estrategias de eficiencia energética. Los avances en los equipos de minería implican vehículos autónomos y eléctricos, supervisión en tiempo real a través de dispositivos IoT y una mejor gestión de los relaves. Este enfoque integrado no solo mitiga el impacto ambiental, sino que también mejora la resiliencia, posicionando a la industria para un crecimiento responsable y sostenible frente a las incertidumbres climáticas.



# PERSPECTIVA ECONÓMICA



En el contexto de la dinámica a largo plazo de la industria minera del cobre, la interacción entre la creciente demanda de materias primas minerales y los retos de suministro inducidos por los fenómenos del cambio climático puede tener profundos efectos en la dinámica del mercado. Se prevé que la demanda de materias primas minerales, como el cobre, se desplace hacia la derecha debido a diversos factores como los avances tecnológicos, el creciente uso en tecnologías de energías renovables y las aplicaciones emergentes.

Sin embargo, el suministro a largo plazo de estos minerales está sujeto a los efectos de los fenómenos inducidos por el cambio climático, lo que crea un escenario complejo. Los riesgos climáticos, como los patrones meteorológicos extremos, el aumento de las temperaturas y los fenómenos hidrometeorológicos, plantean riesgos significativos para las operaciones mineras, como interrupciones operativas, daños a infraestructuras críticas y mayores costes de mantenimiento.

Estos retos pueden limitar la oferta de cobre, afectando a la cantidad disponible en el mercado. Las restricciones del cambio climático sobre la oferta podrían hacer subir los precios debido al aumento de la demanda y a la disponibilidad limitada, reduciendo potencialmente la cantidad demandada.

Por lo tanto, aunque se prevé que la demanda de materias primas minerales aumente a largo plazo, los acontecimientos inducidos por el cambio climático pueden ejercer una presión al alza sobre los precios debido a la limitación de la oferta.

Esto puede dar lugar a una dinámica compleja en la que el mercado experimente un aumento de los precios y una posible disminución de la cantidad demandada, a medida que los consumidores se adaptan al cambiante panorama económico configurado por factores tanto del lado de la demanda como de la oferta.

Esto puede dar lugar a una dinámica compleja en la que el mercado experimente un aumento de los precios y una posible disminución de la cantidad demandada, a medida que los consumidores se adaptan al cambiante panorama económico configurado por factores tanto del lado de la demanda como de la oferta.

En un contexto de cambio climático y ante el aumento constante de riesgos ambientales que impactan en las operaciones de las empresas mineras, el equipo de profesionales de GEM Mining Consulting, con su amplio conocimiento en la materia y respaldado por numerosos proyectos exitosos, está preparado para cuantificar las distintas variables que se ven afectadas por el cambio climático mediante el empleo de las siguientes herramientas:



## ECONOMÍA

Integrar evaluaciones de riesgo climático en estudios y análisis de mercado ayuda a empresas mineras a comprender y enfrentar mejor los impactos climáticos en sus cadenas de suministro, costos y dinámica del mercado, facilitando decisiones más sólidas ante desafíos climáticos.



## ESTRATEGIA

Realizar análisis estratégico de proyectos mineros para estimar potencial VAN y ofrecer respaldo a decisiones, considerando el impacto del cambio climático. Además, desarrollar manuales y directrices que integren las últimas tendencias y metodologías del mercado.



## EVALUACIÓN

Evaluar e mitigar impactos del cambio climático en explotaciones mineras, abordando riesgos climáticos, planificación adaptativa, análisis de escenarios y proporcionando apoyo para decisiones estratégicas en resiliencia climática.



## OPTIMIZACIÓN

Desarrollar una estrategia para reducir costos y abordar incertidumbres del cambio climático, mediante la determinación de estrategias óptimas de mantenimiento, la optimización de procesos integrados mina-planta y la estimación óptima de reservas y fuentes.

# CONCLUSIÓN

La creciente amenaza del cambio climático representa un momento crucial para la industria minera del cobre, que necesita un equilibrio entre afrontar los retos y aprovechar las oportunidades. **El sector lucha contra los crecientes riesgos asociados a los fenómenos inducidos por el clima, que van desde las temperaturas extremas a los fenómenos hidrometeorológicos.** Las estrategias proactivas de mitigación de riesgos y adaptación son imprescindibles para garantizar la sostenibilidad y la resiliencia de las operaciones mineras.

El cumplimiento de las normas medioambientales en evolución es crucial para la viabilidad a largo plazo de la industria. El cumplimiento de las normativas emergentes no sólo satisface los requisitos mundiales, sino que también aumenta el atractivo de la industria para la inversión. Sin embargo, la falta de una estrategia unificada y de una comprensión clara de los componentes medioambientales y de minería sostenible supone un riesgo para la transición del sector de la planificación a las medidas prácticas.

**De cara al futuro, la industria atraviesa una fase de transformación marcada por las innovaciones tecnológicas y las estrategias de adaptación.** Las plantas de desalinización, la adopción de energías renovables y los avances en los equipos de minería son emblemáticos del compromiso del sector con las prácticas responsables. La integración de vehículos autónomos y eléctricos, la supervisión en tiempo real mediante sensores avanzados y la mejora de la gestión de los residuos mineros reflejan un enfoque con visión de futuro.

Aunque persisten retos como la escasez de agua, las interrupciones operativas y las presiones normativas, la respuesta de la industria al cambio climático se orienta hacia el crecimiento sostenible. El futuro exige un enfoque proactivo y flexible para sortear las incertidumbres, reducir el impacto medioambiental y posicionar a la industria minera del cobre para el éxito.

Como ha demostrado la historia, la capacidad de la industria para adaptarse a la dinámica cambiante del cambio climático será decisiva para configurar su trayectoria en los próximos años. Además, la idea de la estrategia de adaptación al cambio climático es importante no sólo para que las empresas aseguren la producción y los costes de cara al futuro, sino también para los países mineros que dependen de su suministro de cobre, ya que también va a repercutir en los ingresos fiscales.



# BIBLIOGRAFÍA

- Agrawala, S., Kramer, A.M., Prudent-Richard, G., & Sainsbury, M. (2010). Incorporating climate change impacts and adaptation in Environmental Impact Assessments: Opportunities and Challenges. OECD Environmental Working Paper No. 24, OECD Publishing, <https://doi.org/10.1787/5km959r3jcmw-en>.
- Cacciuttolo, C. & Valenzuela, F. (2022). Efficient Use of Water in Tailings Management: New Technologies and Environmental Strategies for the Future of Mining. *Water*, 14(11), 1741. <https://doi.org/10.3390/w14111741>.
- Chavalala, B. (2016). An assessment of South Africa's coal mining sector response to climate change adaptation demands. Doctoral Thesis. University of South Africa.
- Crosse, G. (Januray 25, 2023). Challenges and solutions: how mining could embrace the IoT cloud. *Mining Technology*. Recuperado de <https://www.mining-technology.com/features/iot-cloud-mining-esg/?cf-view>.
- Cruz, C., Reyes, A., Jeldres, R.I., Cisternal, L.A., & Kraslawski, A. (2019). Using Partial Desalination Treatment To Improve the Recovery of Copper and Molybdenum Minerals in the Chilean Mining Industry. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2019, 58, 20, 8915–8922. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.9b00821>.
- Elements. (November 15, 2023). All the Metals We Mined in One Visualization. Recuperado de <https://elements.visualcapitalist.com/all-the-metals-we-mined-in-one-visualization-2/>.
- Ford, J.D., Pearce, T., Prno, J., Duerden, F., Ford, L.B., Beaumier, M., & Smith, T. (2010). Perceptions of climate change risks in primary resource use industries: a survey of the Canadian mining sector. *Reg Environ Change*, 10, 65-81. <https://doi.org/10.1007/s10113-009-0094-8>.
- Gasbarro, F. & Pinkse, J. (2016). Corporate Adaptation Behaviour to Deal With Climate Change: The Influence of Firm-Specific Interpretations of Physical Climate Impacts. *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*, 23, 179–192. <https://doi.org/10.1002/csr.1374>.
- GEM (June, 2023). Perspective. ESG Incorporation in Mining. Available at <https://www.gem-mining-consulting.com/perspective-report-gem/>.
- Ghadge, A., Wurtmann, H. & Seuring, S. (2019). Managing climate change risks in global supply chains: a review and research agenda. *International Journal of Production Research*. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1629670>.
- Goldstein, A., Turner, W.R., Gladstone, J. & Hole, D.G. (2019). The private sector's climate change risk and adaptation blind spots. *Nature Climate Change*, 9. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0340-5>.
- Harrop, P. (March 6, 2019). Electric and Autonomous Vehicles in Mining. OEM Off-Highway. Recuperado de <https://www.oemoffhighway.com/trends/electrification/article/21047959/electric-and-autonomous-vehicles-in-mining>.
- Henderson, K. & Maksimainen, J. (August 27, 2020). Here is how the mining industry can respond to climate change. McKinsey Sustainability. Recuperado de <https://www.mckinsey.com/capabilities/sustainability/our-insights/sustainability-blog/here-is-how-the-mining-industry-can-respond-to-climate-change>.
- IPCC. (2014): Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151.
- IPCC. (2023). Climate Change 2023. Synthesis Report. Intergovernmental Panel on Climate Change. Recuperado de [https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_SYR\\_SPM.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_SPM.pdf).
- Janson, E., Markowska, M., Łabaj, P., Wrana, A., & Zawartka, P. (2020). A preliminary assessment of climate change impacts – implications for mining activity in Polish coal regions. *Arch. Min. Sci.*, 65 (3), 703-717. <https://doi.org/10.24425/ams.2020.134142>.
- Klein, J., Käyhkö, J., Räsänen, A., Groundstroem, F., & Eilu, P. (2022). Climate risk perception, management, and adaptation in the Nordic mining sector. *The Extractive Industries and Society*, 10. *The Extractive Industries and Society*. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2022.101092>.
- Loechel, B., Hodgkinson, J., & Moffat, K. (2013). Climate change adaptation in Australian mining communities: comparing mining company and local government views and activities. *Climatic Change*, 119, 465-477. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0721-8>.
- Mason, L., Unger, C., Lederwasch, A., Razian, H., Wynne, L., & Giurco, D. (2013). Adapting to climate risks and extreme weather: A guide for mining and minerals industry professionals. National Climate Change Adaptation Research Facility, Gold Coast.
- Mavrommatis, E. & Damigos, D. (2020). Impacts of climate change on the Greek mining industry: perceptions and attitudes among mining industry practitioners operating in the Cyclades. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, 5(28). <https://doi.org/10.1007/s41207-020-00169-9>.
- Mining Intelligence. (2023). RANKED: World's top copper producers in 2022. Mining.com. Recuperado de <https://www.mining.com/featured-article/ranked-worlds-top-copper-producers-in-2022/>.
- Mining.com. (May 25, 2023). Ranked: World's top copper producers in 2022. Retrieved November 15 from <https://www.mining.com/featured-article/ranked-worlds-top-copper-producers-in-2022/>.
- Moreno-Leiva, S., Haas, J., Junne, T., Valencia, F., Godin, H., Kracht, W., Nowak, W., & Eltrop, L. (2020). Renewable energy in copper production: A review on systems design and methodological approaches. *Journal of Cleaner Production*, 246. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118978>.
- Northey, S.A., Mudd, G.M., Werner, T.T., Jowitt, S.M., Haque, N., Yellishetty, M., & Weng, Z. (2017). The exposure of global base metal resources to water criticality, scarcity and climate change. *Global Environmental Change*, Vol. 44, pp 109-124. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.04.004>.
- Rötzer, N. & Schmidt, M. (2020). Historical, Current, and Future Energy Demand from Global Copper Production and Its Impact on Climate Change. *Resources* 2020, 9(4), 44. <https://doi.org/10.3390/resources9040044>.
- Rüttinger, L., van Ackern, P., Lepold, T., Vogt, R., & Auberger, A. (2019). Impacts of climate change on mining, related environmental risks and raw material supply. Ressortforschungsplan of the Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety. <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>.
- Simpson, N.P., Mach, K.J., Constable, A., Hess, J., Hogarth, R., Howden, M., Lawrence, J., Lempert, R.J., Muccione, V., Mackey, B., New, M.G., O'Neill, B., Otto, F., Pörtner, H.-O., Reisinger, A., Roberts, D., Schmidt, D.N., Seneviratne, S., Strongin, S., van Aalst, M., Totin, E., & Trisos, C.H. (2021). A framework for complex climate change risk assessment. *One Earth* 4. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.03.005>.

Para más información  
sobre GEM



Escanea aquí

# AUTORES



**ISAAC PAREDES**

CGerente de Operaciones  
iparedes@gem-mc.com



**ALINA KARPUNINA**

SIngeniera Analista Senior  
akarpunina@gem-mc.com

# CONTACTO



**JUAN IGNACIO GUZMÁN**

Gerente General

jiguzman@gem-mc.com



Chile: Las Condes 12.461,  
torre 3, oficinas 805-806,  
Las Condes, Santiago

Singapur: 1 Raffles Place #40-02  
One Raffles Place Singapore  
(048616)

<https://www.gem-mining-consulting.com>



Cualquier distribución, copia, duplicación, reproducción o venta no autorizada (total o parcial) del contenido de este documento, ya sea para uso personal o comercial, constituirá una infracción de derechos de autor. Cualquier forma de reproducción total o parcial de su contenido está estrictamente prohibida a menos que se solicite autorización expresa.

# NUESTROS CLIENTES



# CAMBIA LAS REGLAS DEL JUEGO CON DEEPMINE



**OBTÉN RESULTADOS ROBUSTOS CON DEEPMINE**

**EL SOFTWARE DE PLANIFICACIÓN ESTRATÉGICA  
MINERA CON EL MOTOR MÁS POTENTE DEL MERCADO**

