



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

INSUMO CLAVE PARA UN PLAN DE ADAPTACIÓN DEL SECTOR  
MINERO: MAPAS DE RIESGO CLIMÁTICO PARA LA MINERÍA DEL  
COBRE DE LA SEGUNDA REGIÓN.

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL

**JORGE IGNACIO DEL RÍO SÁNCHEZ**

PROFESOR GUÍA:  
**EMILIO CASTILLO DINTRANS**

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
**RODOLFO URRUTIA URIBE**  
**LUIS FELIPE ORELLANA ESPINOZA**

SANTIAGO DE CHILE  
2022

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE:** Ingeniero Civil Industrial  
**POR:** Jorge Ignacio Del Río Sánchez  
**FECHA:** 2022  
**PROFESOR GUÍA:** Emilio Castillo Dintrans

## **INSUMO CLAVE PARA UN PLAN DE ADAPTACIÓN DEL SECTOR MINERO: MAPAS DE RIESGO CLIMÁTICO PARA LA MINERÍA DEL COBRE DE LA SEGUNDA REGIÓN**

En el último tiempo el Cambio Climático ha manifestado sus estragos en cada rincón del mundo y Chile no es la excepción. De hecho, el país cumple con 7 de las 9 características definidas por el IPCC para determinar vulnerabilidad de los países (Center for Climate Change and Resilience Research, 2018). Lo anterior implica que diversos sectores económicos y sociales se ven severamente afectados por eventos climáticos extremos, entre ellos la minería.

La naturaleza del problema conlleva a que el gobierno deba apelar a las políticas públicas de adaptación y mitigación para hacer frente al cambio climático. Esto último, considera como principal instrumento los Planes de Acción Nacional y Planes de adaptación sectorial para el cambio climático, siendo el Ministerio del Medio Ambiente (MMA) la institución a cargo.

Para Chile el sector minero es de vital importancia. Solo la minería del cobre aporta al 9% del Producto Interno Bruto (PIB) nacional, destacándose con el 28% de la producción mundial de dicho mineral, siendo líderes a nivel global (Cochilco, 2020).

A pesar de esto último, se han elaborado nueve planes de adaptación sectoriales para el cambio climático, de los cuales ninguno corresponde al minero, siendo unas de las principales razones la falta de estudios respecto a los riesgos y vulnerabilidades del sector.

Es por ello que el presente trabajo trata de la creación de mapas de riesgos climáticos para el sector minero de Antofagasta, ya que serían un insumo de gran utilidad para la elaboración de un plan de adaptación del sector minero de la región. Por lo tanto, se estudia el riesgo asociado al clima para 4 subcomponentes mineras: Extracción minera, plantas de concentración, instalaciones de apoyo y depósitos RMM. Para determinar dicho riesgo se analizan tres factores del sistema: Amenazas, vulnerabilidades y exposiciones, siguiendo la metodología propuesta por GIZ and Eurac (2017).

Las amenazas que se consideran son lluvias extremas, olas de calor y sequías, ya que conllevan serias consecuencias económicas y humanas. Mientras que la exposición corresponde a la cantidad de instalaciones del subcomponente de estudio que están contenidos en una superficie de 25 km<sup>2</sup>. Finalmente, los factores de vulnerabilidad son características de los subcomponentes que aumentan o disminuyen el riesgo respecto a un evento climático. Dichos factores son: Tamaño de la faena, acceso a recursos hídricos alternativos, cercanía con servicios de urgencia, y coordinación entre empresas. Teniendo cuantificados estos factores, se procede a determinar el riesgo climático para el sector minero de Antofagasta, obteniendo cinco mapas de riesgo climático.

A mi madre, padre, hermanos,  
amigos, perros y gatos.

Saludos

# Agradecimientos

Me gustaría comenzar agradeciendo de manera general a la gente del proyecto FONDEF de Minería y Cambio Climático, por el apoyo en el desarrollo de este trabajo. Me gustaría agradecer a los miembros de la comisión evaluadora, Luis Felipe Orellana, Rodolfo Urrutia y especialmente a Emilio Castillo, quienes con sus constantes comentarios y feedback hicieron que este trabajo mejorara a través del tiempo, entregándome valiosos aprendizajes para el comienzo de mi vida laboral.

Luego de casi 7 años de carrera, quiero agradecer a las personas que han sido parte de este largo proceso: A mis amigos de siempre, quienes siempre han estado junto a mi sin importar el contexto; a mi hermano, que a veces suelo admirar en secreto; a mi papá, a quién escucho más de lo que cree; a mi hermana pequeña, que me motiva a pensar la importancia de hacer bien las cosas para el futuro (y futuras generaciones); a mis cuatro perros que están y los que han pasado, y que entregan esa cuota de felicidad que tanto necesito; a mi gatita miel, que me cambió la vida en plena pandemia y que me acompañó en mis últimas clases y exámenes desde la casa; al gato algodón, el gato más humilde que he conocido; a mi madre, quién mi inculcó la perseverancia, de manera tierna y a la vez severa, y ha sido mi compañera de estallido y pandemia; a mi abuela, que desde noviembre de 2020 ya no está físicamente con nosotros, pero a quién le debo eternamente la persona que soy ahora; y por último quiero agradecer a mí mismo. Por no aflojar en los momentos más complicados, por terminar lo que comienzo y siempre querer dar un poco más.

“No sólo hubiéramos sido nada sin ustedes, sino con toda la gente que estuvo alrededor desde el comienzo; algunos siguen hasta hoy...Gracias...Totales”.

# Tabla de contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Antecedentes</b>	<b>3</b>
<b>2.1. Cambio climático en Chile</b>	<b>3</b>
2.1.1. Cambio en temperaturas	3
2.1.2. Cambio en las precipitaciones	4
2.1.3. Cambio climático en Antofagasta	4
<b>2.2. Minería en Chile y Antofagasta</b>	<b>5</b>
<b>2.3. Conceptos claves</b>	<b>9</b>
<b>2.4. Institucionalidad y políticas públicas Cambio Climático en Chile</b>	<b>10</b>
2.4.1. Institucionalidad de Cambio Climático en Chile	10
2.4.2. Política pública y cambio climático en Chile	10
2.4.3. Estructura del PANCC	12
<b>2.5. Problemática</b>	<b>15</b>
<b>2.6. Riesgo y vulnerabilidad</b>	<b>17</b>
<b>3. Objetivos y alcances</b>	<b>18</b>
<b>3.1. Objetivos específicos</b>	<b>18</b>
<b>3.2. Alcances</b>	<b>19</b>
3.2.1. Subcomponentes mineros consideradas	19
<b>4. Marco Conceptual</b>	<b>21</b>
<b>4.1. Caso internacional</b>	<b>21</b>
<b>4.2. Contexto nacional</b>	<b>22</b>
4.2.1. Atlas de Riesgo Climático: ARClím	22
<b>5. Metodología y datos</b>	<b>24</b>
<b>5.1. Metodología</b>	<b>24</b>
5.1.1. Cadenas de impacto	24
5.1.2. Indicadores	26
5.1.3. Visualización de los componentes	26
5.1.4. Representación del riesgo	27
<b>5.2. Datos</b>	<b>28</b>
5.2.1. Datos catastro de faenas en Chile	29
5.2.2. Datos índices climáticos	32
5.3. Secuencia de pasos para estimar riesgo	34
<b>6. Determinación del sistema y cadenas de impacto: Amenaza, exposición y vulnerabilidades.</b>	<b>34</b>
<b>6.1. Sistemas y subcomponentes</b>	<b>34</b>
<b>6.2. Amenazas: determinación e índices</b>	<b>36</b>
6.2.1. Amenazas climáticas y riesgos en la minería	36

6.2.2.	Índices de amenazas .....	41
<b>6.3.</b>	<b>Riesgos e impactos .....</b>	<b>44</b>
6.3.1.	Riesgo asociado a lluvias extremas .....	44
6.3.2.	Riesgo asociado a sequía.....	45
6.3.3.	Riesgos asociados a olas de calor .....	47
<b>6.4.</b>	<b>Exposición .....</b>	<b>48</b>
<b>6.5.</b>	<b>Vulnerabilidades.....</b>	<b>52</b>
6.5.1.	Taller de expertos .....	52
6.5.2.	Índices de vulnerabilidad .....	55
<b>6.6.</b>	<b>Normalización de los factores.....</b>	<b>60</b>
6.6.1.	Normalización de amenazas .....	60
6.6.2.	Normalización exposición.....	61
6.6.3.	Normalización vulnerabilidades.....	62
<b>7.</b>	<b><i>Resultados: Amenazas, exposición, vulnerabilidades y riesgo .....</i></b>	<b>63</b>
<b>7.1.</b>	<b>Mapas de amenazas.....</b>	<b>63</b>
<b>7.2.</b>	<b>Mapas de exposición.....</b>	<b>64</b>
<b>7.3.</b>	<b>Mapas de vulnerabilidades.....</b>	<b>65</b>
7.3.1.	Lluvias extremas .....	65
7.3.2.	Olas de calor.....	67
7.3.3.	Sequía.....	69
<b>7.4.</b>	<b>Mapas de riesgo climático.....</b>	<b>71</b>
7.4.1.	Lluvias extremas .....	71
7.4.2.	Olas de calor.....	74
7.4.3.	Sequía.....	75
<b>8.</b>	<b><i>Análisis y conclusiones .....</i></b>	<b>76</b>
<b>8.1.</b>	<b>Ejemplo uso de los mapas.....</b>	<b>76</b>
8.1.1.	Adaptación a las olas de calor .....	76
<b>8.2.</b>	<b>Consideraciones importantes de los resultados .....</b>	<b>78</b>
<b>8.3.</b>	<b>Conclusión.....</b>	<b>80</b>
<b>9.</b>	<b><i>Bibliografía.....</i></b>	<b>81</b>
<b>Anexos .....</b>	<b>87</b>	
<b>Anexo A: Cadenas de impacto .....</b>	<b>87</b>	
<b>Anexo B: Elaboración de planes de Adaptación sectoriales.....</b>	<b>92</b>	
<b>Anexo C: Mapas de vulnerabilidad de lluvias extremas.....</b>	<b>94</b>	

## 1. Introducción

En los últimos decenios, los cambios en el clima han causado impactos en los sistemas naturales y humanos en todos los continentes y océanos. Lo anterior se atribuye al calentamiento y/o a los cambios en los patrones de precipitación. También es cada vez más clara la evidencia de los impactos de la acidificación del océano (IPCC, 2021).

Los impactos de los recientes fenómenos extremos conexos al clima, como olas de calor, sequías, inundaciones, ciclones e incendios forestales, ponen de relieve una importante vulnerabilidad y exposición de algunos ecosistemas y muchos sistemas humanos a la actual variabilidad climática. Entre los impactos de esos fenómenos extremos figuran la alteración de ecosistemas, la desorganización de la producción de alimentos y el suministro de agua, daños a la infraestructura y los asentamientos, morbilidad y mortalidad, y consecuencias para la salud mental y el bienestar humano. Para los países, independientemente de su nivel de desarrollo, esos impactos están en consonancia con una importante falta de preparación para la actual variabilidad climática en algunos sectores (IPCC, 2021).

Chile cumple con 7 de las 9 características definidas por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) para determinar vulnerabilidad de los países: zonas costeras bajas, ecosistemas de montaña, áreas propensas a desastres naturales, ecosistemas frágiles, espacios proclives al deterioro forestal, territorios expuestos a sequías y desertificación y zonas urbanas altamente contaminadas (Center for Climate Change and Resilience Research, 2018). Esto último, hace evidente la relevancia de entender lo que depara al país en materia de cambio climático.

Estos fenómenos afectan diversos sectores tanto sociales como económicos, y uno de ellos es la minería. De hecho, se prevé que las condiciones climáticas afectarán a la estabilidad y efectividad de la infraestructura y equipo, la protección ambiental, el cierre de faenas, y la disponibilidad de rutas de transportes. El cambio climático también puede impactar la estabilidad y costo del recurso hídrico y los suministros de energía (Nelson and Schuchard, 2011).

En la síntesis ejecutiva de Minería y Cambio climático elaborado por Beauchef Minería se señala que “La minería en Chile enfrenta un escenario complejo y sin precedentes, producto del cambio climático y otras problemáticas ambientales. Esto impone importantes desafíos de mitigación y adaptación, sobre todo para la minería del cobre, debido a que, al ser un metal clave para el desarrollo de tecnologías limpias, su demanda experimentará un incremento a nivel global” (Kracht, W. & Salinas Trentini, B.,2021).

En un caso más concreto, en el año 2019 entre enero y febrero fenómenos climáticos afectaron a Antofagasta y otras regiones del norte, provocando una fuerte merma en la producción, obligando al Banco Central a recortar la proyección de crecimiento para dicho periodo y entregando un IMACEC de 1.4% para el mes de febrero (Alta Ley, 2019).

Esto último da claras señales que el incremento de los eventos climáticos extremos en los últimos años afecta cada uno de los eslabones productivos del negocio minero, además de sus activos y su disponibilidad de recursos (Gardiner, 2012). En el 2010, una investigación sobre perspectivas de la industria indicaba que esto ya era una preocupación emergente para la industria minera, pero que las acciones tomadas para planificar o adaptarse eran muy limitadas. Según Steffen (2013) la

incertidumbre inherente a la predicción meteorológica acrecienta la vulnerabilidad y se espera que a futuro el suministro de minerales sea impactado con mayor intensidad por el incremento de la frecuencia y severidad de los eventos climáticos extremos.

Lo mencionado toma especial relevancia para Chile ya que la minería es uno de los principales motores económicos del país. De hecho, al año 2019, sólo la minería del cobre representó el 9% del Producto Interno Bruto (PIB) a nivel nacional (Consejo Minero, 2020). La región más relevante en esta materia es Antofagasta, la cual aportó el 54% de la producción nacional minera (Consejo Minero, 2020).

Dada la naturaleza de la problemática, en la literatura se señalan dos formas para enfrentar el cambio climático: mitigación y adaptación. Por un lado, la mitigación busca principalmente la disminución de las emisiones de CO<sub>2</sub> para no llegar a escenarios catastróficos respecto al calentamiento global. Mientras que la adaptación, a través de una serie de medidas de acción, se intentará adaptar a diferentes sectores a los fenómenos inevitables del clima. Por lo tanto, para el presente trabajo se considera la línea de adaptación, dejando de lado lo que concierne la mitigación.

Para lograr impactos de adaptación, es de vital importancia la elaboración de políticas públicas para el cambio climático, siendo el Ministerio del Medio Ambiente (MMA) la principal institución a cargo. Uno de los instrumentos más importantes para generar e implementar las políticas son los Planes de Acción Nacional para el Cambio Climático (PANCC), los cuales contienen la información necesaria para tomar acciones, medidas y asegurar los medios de implementación de éstas últimas. Además, del PANCC derivan los Planes de Adaptación Nacionales y Sectoriales para el Cambio Climático, los que se convierten en los insumos principales para alcanzar la adaptación de un determinado sector.

A pesar de la importancia de la minería, y las vulnerabilidades que presenta Chile respecto al cambio climático, hasta el primer trimestre de 2022, no se han creado ni mucho menos implementado algún plan de adaptación al cambio climático para dicho sector, lo cual deja en evidencia la necesidad de levantar información y realizar estudios de cómo esta problemática podría afectar a la minería en el futuro.

Considerando el sobresaliente aporte de la región de Antofagasta a la producción minera nacional, y la importancia de la minería del cobre en el país, el presente trabajo busca estudiar los riesgos climáticos que el sector minero del cobre de dicha zona podría enfrentar en el futuro, para de esta manera contribuir a los insumos necesarios para la elaboración de un plan de adaptación sectorial.

## 2. Antecedentes

### 2.1. Cambio climático en Chile

#### 2.1.1. Cambio en temperaturas

De acuerdo con un estudio desarrollado por académicos de la Universidad de Chile, bajo distintos modelos de simulación, para los periodos 2016-2035, 2046-2065 y 2081-2100, y para tres escenarios: optimista (RCP2.6), conservador (RCP 4.5) y pesimistas (RCP8.5<sup>1</sup>), se prevé un cambio en las temperaturas mínimas y máximas.

Respecto a las temperaturas mínimas, para el escenario más favorable (RCP2.6), se proyectan aumentos de hasta 2°C para todo Chile en los tres periodos de estudio. Para el modelo más pesimista (RCP8.5), se esperan aumentos de hasta 2°C en el futuro cercano (2016-2035), hasta 4°C para el futuro medio (2046-2065) y aumentos sobre los 4°C para el futuro lejano (2081-2100). Para este último, los aumentos de temperatura en los meses de invierno son mayores que los proyectados en verano (Araya-Osses, D et al., 2020).

Para las temperaturas máximas, el modelo más favorable indica que los aumentos también serían de hasta 2°C para todo Chile en los tres periodos. El escenario más negativo proyecta aumentos de hasta 2°C para todo el país en el futuro cercano (2016-2035), aumentos sobre los 4°C en los meses de invierno para el futuro medio (2046-2065), y aumentos entre 2°C y 4°C en las otras temporadas. Las proyecciones para el futuro lejano indican aumentos sobre los 6°C en los meses de invierno y sobre los 4°C en las otras temporadas (Araya-Osses, D et al., 2020).

Estos cambios en las temperaturas son relevantes ya que, si aumentan las temperaturas mínimas y máximas, se afecta el lugar donde nieva, aumentando la isoterma. Por lo tanto, se acumulará menos nieve ya que hay una transferencia de sólido a líquido, aumentando la escorrentía invernal y disminuyendo la de verano, lo que conlleva a que no se acumule agua para los periodos no invernales. (Araya-Osses, D et al., 2020). Otras consecuencias que ya se están observando por el aumento de las temperaturas son el aumento del nivel del mar, el cual podría subir entre 18 y 59 centímetros al final de este siglo y si los polos continúan derritiéndose, podrían aumentar entre 10 y 20 centímetros adicionales (Araya-Osses, D et al., 2020).

A su vez habrá menos agua dulce disponible. Por ejemplo, si la capa de hielo del glaciar Quelccaya en Perú continúa derritiéndose como hasta ahora, desaparecerá en el 2100 dejando sin el recurso hídrico a miles de personas que cuentan con ella para conseguir agua potable y generación de electricidad (IPCC, 2007). Este último caso puede extrapolarse a Chile, ya que el 82% de los glaciares de América del Sur está en el país, existiendo casi 24 mil glaciares de Arica a Punta Arenas, y son de vital importancia porque en épocas de sequía los gigantes de hielo llegan a suministrar hasta el 70% del caudal de los ríos en la zona norte y centro de Chile (Greenpace Chile, 2014).

---

<sup>1</sup> Trayectoria de concentración representativa (RCP, por sus siglas en inglés). Son trayectorias de concentración de gases de efecto invernadero (CO<sub>2</sub>) a las que se podría llegar en el año 2100. Los valores suelen ser RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6 y RCP 8.5, lo cual representa la cantidad de CO<sub>2</sub> expresado en Watts por metro cuadrado. (IPCC, 2019).

### **2.1.2. Cambio en las precipitaciones**

Las estimaciones de precipitaciones presentan mayor variabilidad espacial en comparación a los resultados de temperatura. Desde un punto de vista general, se prevén disminuciones de entre un 20% y un 80% en las precipitaciones entre las regiones de Valparaíso y Aysén, dependiendo del escenario y futuro considerado. Además, se destaca que las proyecciones para el periodo 2081-2100 bajo el escenario más pesimista, muestran bajas en las precipitaciones por sobre el 60% entre las regiones de Atacama y Los Ríos, tanto en verano como en invierno, mientras que en el altiplano y la zona austral las precipitaciones aumentarían sobre un 40 y 20 %, respectivamente (Araya-Osses, D et al., 2020).

En Chile cada vez llueve menos, de hecho, el país ya acumula los diez años más secos de toda su historia, desde que se empezaron a tener registros de precipitaciones en 1915. En un ejemplo más concreto, entre el año 2016 y 2020, el embalse El Yeso sufrió una caída de 99 millones de metros cúbicos en solo 4 años. En la actualidad solo está lleno a un 40% de su capacidad (BBC, 2020).

### **2.1.3. Cambio climático en Antofagasta**

La Región de Antofagasta (II) se ubica en el norte de Chile, entre 20°56' a los 20°05' de latitud sur, y longitudinalmente, desde los 67°00' de longitud oeste, hasta el Océano Pacífico. La superficie regional abarca un área de 126.094 Km<sup>2</sup>, destacando su clima árido, escasez hidrográfica y poca vegetación (Flores, 2016).

Para efectos del trabajo, es necesario entender cuáles son las amenazas climáticas a las que la Región de Antofagasta puede estar comprometida. Como se mencionó anteriormente, uno de los eventos primarios de cambio climático que sufrirá Chile serán los cambios en las precipitaciones, y la segunda Región no ha estado exenta de los estragos ocasionados por inesperadas lluvias torrenciales.

De acuerdo con el mapa de Amenazas por inundaciones elaborado en el proyecto Atlas de Riesgo Climático (ARClím), para el periodo que abarca climas históricos (entre 1980-2010), la Provincia de Antofagasta es situada como una zona con alta amenaza respecto a las inundaciones. Incluso para el futuro cercano (2035-2065), se prevé que dicho lugar mantendrá esta amenaza (ARClím, 2020). Sin ir más lejos, fuertes lluvias afectaron la mencionada región entre el 24 y 26 de marzo del 2015, lo que provocó desbordamientos de diferentes ríos debido a las inusuales lluvias en el área, dejando un total de 28 fallecidos, 59 desaparecidos y 16.588 damnificados entre la segunda y la tercera región (Onemi, 2015).

Por otro lado, la segunda región se caracteriza por su escasez hídrica y lleva años abasteciendo con agua a su población desde diversas fuentes. Según se especifica en la memoria de título “Agua desalinizada, ¿solución a la escasez hídrica en la ciudad de Antofagasta, Chile?”, desde el año 2003 dicho territorio cuenta con una planta desalinizadora de agua de mar ubicada en La Chimba la cual genera agua potable mediante osmosis inversa. En la actualidad dicha planta abastece el 50% de la demanda de la ciudad, y la restante se satisface con agua de cordillera (ECONSSA, 2013).

Dentro del mismo trabajo, se hace hincapié que, si bien la producción de agua desalinizada a la ciudad ha contribuido al acceso de agua potable a la población, la localización de una planta en sí, tiene asociado ciertos riesgos; por ejemplo, ante la ocurrencia de un tsunami su funcionamiento se puede ver alterado afectando el suministro. Esto se desprende de la Carta de Inundación por Tsunami para la ciudad de Antofagasta en donde se evidencia que toda la zona costera de la región

puede verse afectada por este fenómeno, por lo que depender de manera completa del agua desalinizada tiene un evidente riesgo para las comunidades que habitan aquel sector, acrecentando el problema de escasez hídrica en la región (Flores, M., 2016).

ARClím también elaboró mapas de los cambios en las temperaturas máximas. Siguiendo esa misma referencia, para la segunda Región, se prevé un aumento promedio en 2°C en la temperatura máxima, llegando incluso a un aumento en 2.6°C para San Pedro de Atacama. De acuerdo con la plataforma meteorológica Weather Spark, normalmente la temperatura varía entre los 13°C a 25°C y rara vez baja a menos de 10°C o sube más de 27°C. Pero estos valores fueron altamente sobrepasados en agosto del 2019, debido a una ola de calor que elevó los termómetros hasta los 35°C, provocando que incluso se levanten alertas preventivas para cuidar la salud de las personas (Cooperativa, 2019).

En el último tiempo, la región también ha sufrido por la ocurrencia de vendavales. En junio de 2021, en la Provincia de El Loa, se registraron vientos de hasta 100 km/h, provocando tormentas de polvo. En Ollagüe, debieron suspenderse clases presenciales ya que resultaba imposible el desplazamiento de las personas producto de la tormenta de polvo generada por el viento. En tanto, en el sector de Peine, ubicada en San Pedro de Atacama, una gran cantidad de viento imposibilitó el desplazamiento de vehículos (Bio-Bio Chile, 2021).

En resumen, la segunda región ha sido afectada principalmente por los siguientes fenómenos climáticos:

- Lluvias torrenciales
- Sequía
- Olas de calor
- Vendavales

## **2.2. Minería en Chile y Antofagasta**

Con el paso de los años, ha sido evidente para los chilenos la importancia de la minería en la economía. Según datos del Banco Central, en el año 2019, el sector minero aportó cerca de 27 mil millones de dólares a la producción nacional, correspondiente al 12% del Producto Interno Bruto (PIB) del país, siendo la minería del cobre la más relevante, la que contribuyó con 23.7 mil millones de dólares, correspondiente al 9% del PIB (Consejo Minero, 2020). De acuerdo con la Figura 1, se observa una baja en la participación del PIB minero el cual cayó de un 16% en el 2010 a un 9% en el 2015, estabilizándose en los últimos 5 años entre el 8 y el 10%.

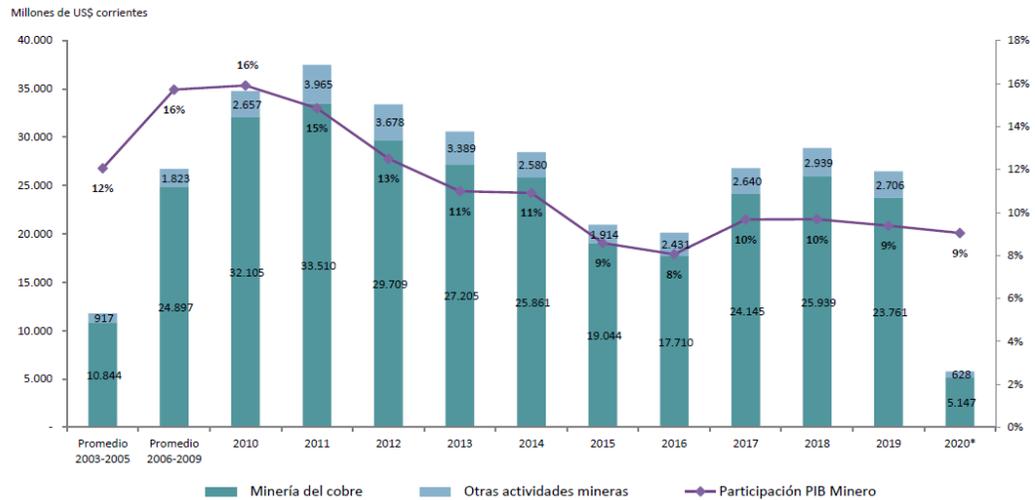


Figura 1: PIB del sector minero y su participación en el PIB nacional. Fuente: Consejo Minero a partir de información del Banco Central de Chile.

Según lo expuesto en el Anuario de Estadísticas del Cobre y Otros minerales (2009-2019) (Cochilco, 2020), en el año 2019 se produjeron un total de 5.787,4 miles de toneladas de cobre, un 0.75% menos respecto al periodo anterior (5.831,6 miles de toneladas, en el 2018). Con estas cifras, Chile alcanzó el 28% de la producción del mineral a nivel mundial, siendo el líder en esta materia (ver Figura 2) (Consejo Minero, 2020). Codelco, a través de sus divisiones alcanzó los 1.706,2 miles de toneladas, aportando el 29,4% de la producción nacional. Se destaca también la minera “La Escondida”, que logró 1.187,8 miles de toneladas del mineral, correspondiente al 20,5% del total a nivel país (Cochilco, 2020).

A nivel de regiones, según datos del Sernageomin, Antofagasta fue la que más aportó en la producción, con un total de 3.160 miles de toneladas, correspondiente al 54% del total nacional. Es seguido por la Región de Tarapacá, donde se produjeron 640,4 miles de toneladas (11%), mientras que en Atacama se llega a los 483,6 miles de toneladas, aportando con el 8,3% del total.

Estas últimas cifras indican que solo en la región de Antofagasta se produce el 15% del cobre a nivel mundial, lo que se traduce en un aporte al PIB del 4.8% a nivel país. A su vez, la minería aporta al 54% del PIB regional de Antofagasta, siendo la región donde más influye dicho sector (ver Figura 3).

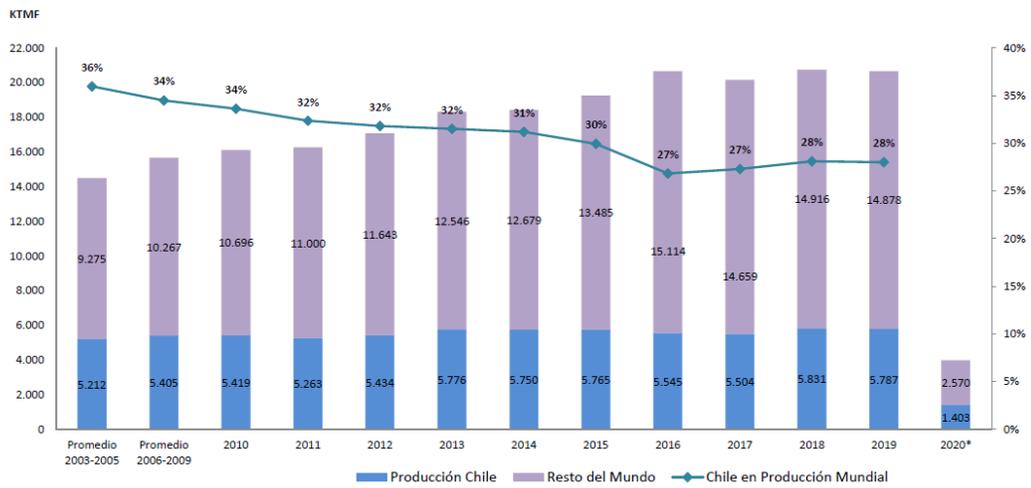


Figura 2: Producción de cobre en Chile y el mundo. Fuente: Consejo Minero a partir de información Cochilco

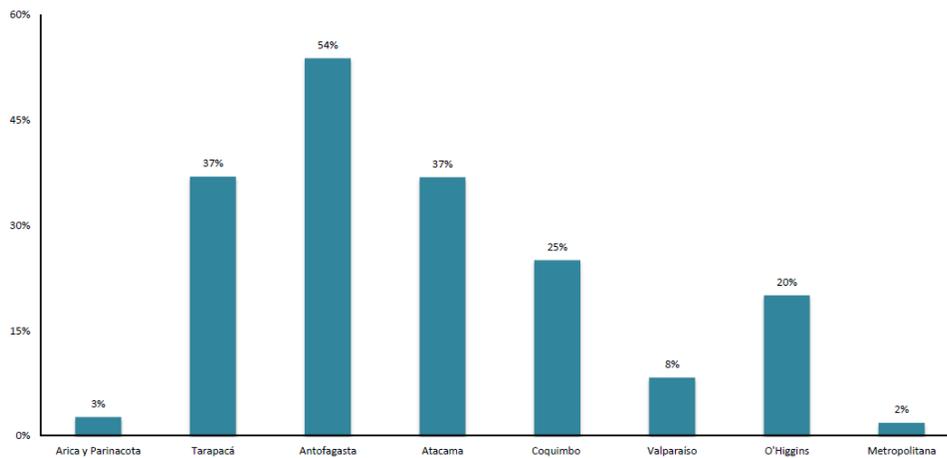


Figura 3: Participación de la minería en el PIB de regiones. Fuente: Consejo Minero a partir de información del Banco Central de Chile. 2018

El aporte de la minería al país no solo se refleja en lo económico, sino que también en los empleos. A nivel nacional el sector abarcó el 9% de la fuerza laboral en el 2020, considerando empleos directos e indirectos a la minería (ver Figura 4).

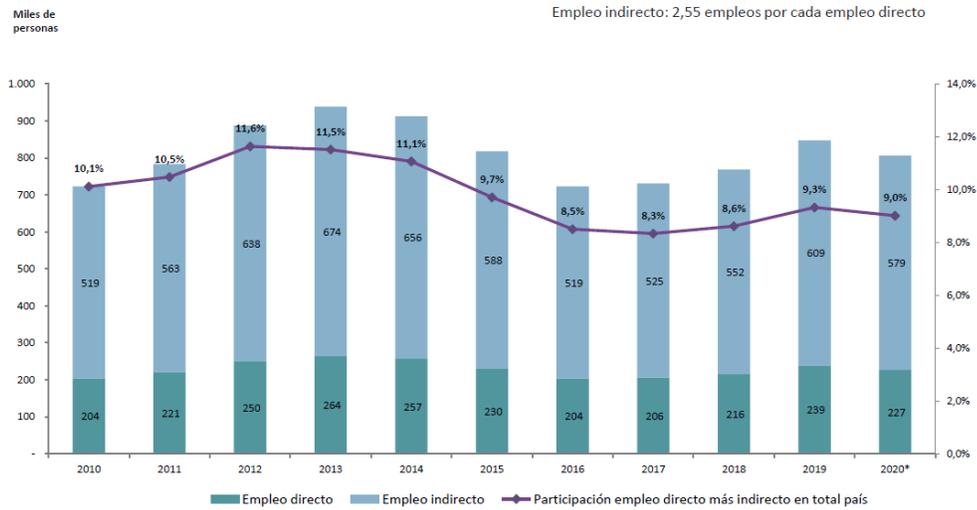


Figura 4: Empleo directo en minería, empleo indirecto generado en otros sectores y participación en el empleo del país. Fuente: Consejo Minero a partir de información del INE y Cochilco. 2020

Mientras tanto, sólo en la región de Antofagasta el sector minero participa en el 59% de los empleos de la zona, considerando empleos directos e indirectos. Es seguido por Atacama, en la cual el sector extraccionista aporta con el 54% de los empleos de la región (ver Figura 5).

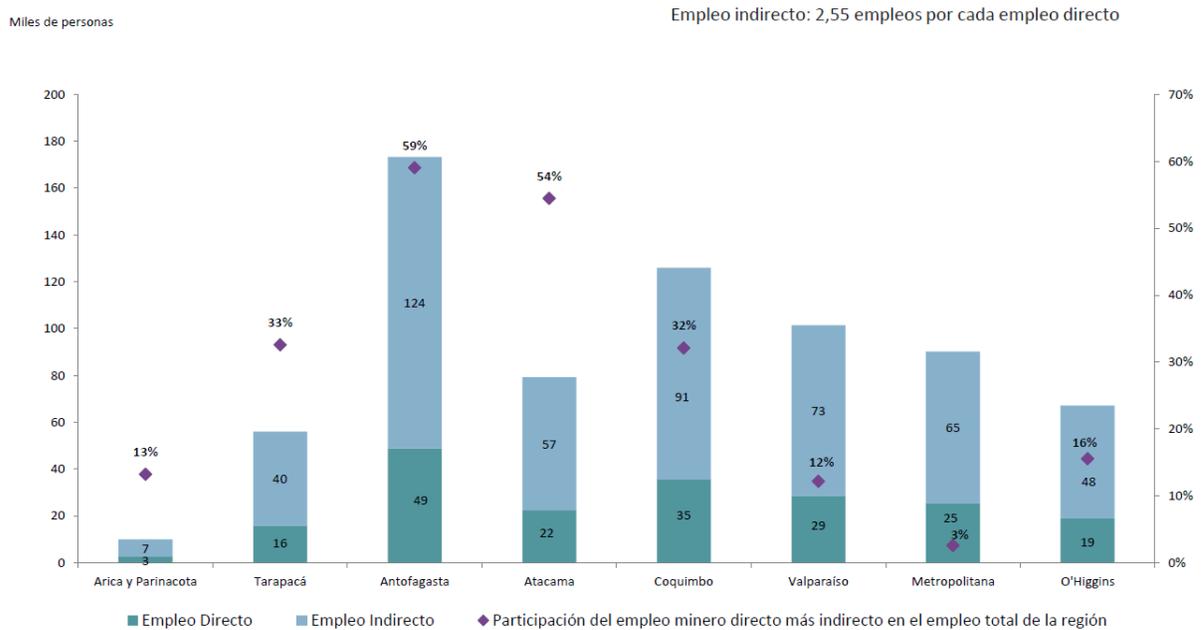


Figura 5: Empleo directo en minería, empleo indirecto generado en otros sectores y participación en el empleo regional. Fuente: Consejo Minero a partir de información del INE y Cochilco. 2019.

Considerando estos antecedentes, es posible dilucidar la importancia de la minería para el país y especialmente para Antofagasta. Por lo tanto, el presente trabajo centra el estudio en la segunda región, la cual también se prevé que tiene una alta vulnerabilidad respecto al clima.

### 2.3. Conceptos claves

A continuación, se presentan conceptos claves que serán utilizados en los siguientes capítulos del informe. Estos tienen relación con los factores estudiados en el contexto del cambio climático.

**Riesgo (climático):** Se define como las consecuencias potenciales e intensidad esperada de impactos negativos sobre un territorio, sistemas sociales y comunidades humanas que resultan afectadas por un cambio climático (IPCC, 2014).

**Amenaza:** Corresponde a una condición climática cuya potencial ocurrencia puede resultar en pérdidas de vidas, accidentes y otros impactos en salud, como también en pérdidas de propiedad, infraestructura, medios de subsistencia, provisión de servicios, ecosistemas y recursos medio ambientales. Una amenaza puede ser un evento climático (Por ejemplo: un evento de lluvia intensa), pero también puede ser un impacto físico directo (Por ejemplo, una inundación) (GIZ and EURAC, 2017).

**Exposición:** La presencia de personas, medios de subsistencia, servicios y recursos ambientales, infraestructura, o activos económicos, sociales o culturales, en lugares que podrían verse afectados negativamente. El grado de exposición puede ser expresado en números absolutos, densidades o proporciones de los elementos en riesgo (Por ejemplo: densidad de la población en un área afectada por la sequía) (GIZ and EURAC, 2017).

**Vulnerabilidad:** La propensión o predisposición a verse afectado negativamente. La vulnerabilidad se compone de una variedad de conceptos y elementos, entre ellos la sensibilidad o susceptibilidad al daño y la falta de capacidad para responder y adaptarse. La vulnerabilidad hace referencia a esos atributos relevantes de los elementos expuestos y el sistema en el cual están incorporados (por ejemplo: la vulnerabilidad de la población y de sus alrededores en un pueblo localizado en un área propensa a la sequía) lo cual puede incrementar (o disminuir) las consecuencias potenciales de una amenaza climática. Los dos elementos relevantes de la vulnerabilidad se definen como (GIZ and EURAC, 2017):

- **Sensibilidad:** Es determinada por los factores que afectan directamente las consecuencias de una amenaza. Sensibilidad puede incluir atributos físicos de un sistema (como el material de construcción de las casas, tipo de tierra en un campo de agricultura, etc), sociales, económicos y culturales.
- **Capacidad:** En el contexto de determinación de un riesgo climático, hace referencia a la habilidad de las comunidades para prepararse y responder a impactos climáticos actuales y futuros. Se divide en dos tipos:
  - **Capacidad de enfrentar:** La habilidad de personas, instituciones, organizaciones y sistemas, de usar las habilidades disponibles, valores, creencias, recursos y oportunidades para determinar, gestionar y superar condiciones adversas en el corto hasta el mediano plazo. (Por ejemplo: un sistema de advertencia en un lugar).
  - **Capacidad de adaptación:** La habilidad de los sistemas, instituciones, humanos y otros organismos de ajustarse a daños potenciales, aprovechar oportunidades, o de

responder a las consecuencias (por ejemplo, conocimiento para introducir nuevos métodos de cosechas, en un contexto de riesgo para la agricultura).

**Impactos:** Efectos en sistemas naturales y humanos. En el reporte del IPCC, el término se usa primeramente para referir a los efectos en sistemas naturales y humanos en eventos extremos del clima, tiempo y cambio climático. Los impactos generalmente hacen referencia a los efectos en vidas, sustentos, salud, ecosistemas, económicos, culturales, servicios, e infraestructura debido a la interacción con cambios climáticos o eventos de amenaza climática ocurridas dentro de un periodo específico de tiempo y la vulnerabilidad de un sistema o sociedad expuesta (GIZ and EURAC, 2017).

## **2.4. Institucionalidad y políticas públicas Cambio Climático en Chile**

Los antecedentes expuestos ponen de relieve la necesidad de hacer frente al cambio climático. Es un problema inminente que amenaza de manera transversal diversos sectores tanto sociales y medio ambientales como económicos, y esto último da muestra que el cambio climático (CC) debe ser abordado por las entidades gubernamentales de un país.

### **2.4.1. Institucionalidad de Cambio Climático en Chile**

Desde inicios de los años 90, Chile ha sido activo respecto a los cambios en los patrones climáticos, y prueba de ello han sido las instituciones creadas desde dicha época para enfrentar la problemática.

En marzo de 1994 se crea la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA), mediante la Ley sobre bases generales del Medio Ambiente (Ley N°19.300). Esta institución tuvo como principales funciones actuar como un servicio de consulta, análisis, comunicación y coordinación en materias relacionadas con el medio ambiente y proponer políticas para la gestión ambiental al Presidente de la República, entre otras.

El 26 de mayo de 1996 se crea el Comité Nacional Asesor para el Cambio Global (CNACG). Tuvo un rol relevante en la discusión de las posiciones nacionales a presentar en negociaciones internacionales y en la generación de instrumentos de política de cambio climático a nivel nacional (BCN, 2017).

En el 2010, se funda el Ministerio del Medio Ambiente (MMA), reemplazando a la CONAMA. En el mismo año, bajo el alero de la subsecretaría del MMA se forma la Oficina de Cambio Climático (OCC) la cual se transformó en la División de Cambio Climático (DCC) en el año 2017. Es a través del DCC que el MMA propone y formula políticas de CC.

### **2.4.2. Política pública y cambio climático en Chile**

Para tomar medidas políticas y sectoriales respecto a los cambios que sufre el clima se debe recurrir a instrumentos de política pública. Estos se definen como mecanismos y técnicas para implementar o dar efecto a las políticas públicas (Salamon, 2002).

En consecuencia con lo anterior, la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) señala dos ejes estratégicos para hacer frente al CC (BCN, 2017): mitigación y adaptación. El primer eje considera la mitigación entendida como la reducción de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) y/o incrementar la absorción/captura de CO<sub>2</sub> de la atmósfera mediante sumideros. El segundo eje, adaptación, se entiende como proceso de ajuste

al clima real o proyectado y sus efectos. En los sistemas humanos, la adaptación trata de moderar o evitar daños o aprovechar las oportunidades beneficiosas. En algunos sistemas naturales, la intervención humana puede facilitar el ajuste al clima proyectado y sus efectos (IPCC, 2021). Se debe tener en cuenta que el presente trabajo tiene estrecha relación con el eje de adaptación, dejando de lado la mitigación.

En este contexto, uno de los principales instrumentos de política pública son los Planes de Acción Nacional de Cambio Climático, lo cuales están orientados a la implementación efectiva de medidas que se han identificado para adaptarse al cambio climático y la reducción de la vulnerabilidad del país, contribuyendo al cumplimiento de los compromisos internacionales de Chile ante la CMNUCC (MMA, 2017).

La CONAMA elaboró el primer Plan de Acción Nacional de Cambio Climático (PANCC I). Fue publicado en diciembre de 2008 y reunía las principales medidas y acciones a tomar a nivel país para el periodo entre el 2008 al 2012. Se estructuró en base a los tres ejes definidos en la Estrategia Nacional de Cambio Climático del 2006: la adaptación al CC, la mitigación y la creación y fortalecimiento de capacidades (BCN, 2017). En cumplimiento con el PANCC I, se elaboró el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNA) y cuatro planes sectoriales de Adaptación: silvoagropecuario, biodiversidad, pesca y acuicultura y salud (MMA, 2017).

La División de Cambio Climático del MMA estuvo a cargo de la elaboración del segundo Plan de Acción Nacional de Cambio Climático (PANCC II), el cual se construyó sobre el PANCC I, actualizando los puntos débiles que tenía el anterior. Este último plan abarca las acciones y medidas que se toman respecto al CC para el periodo 2017-2022. El plan contiene un total de 96 medidas que pertenecen a 30 líneas de acción que corresponden a los tres ejes temáticos del plan: Adaptación, Mitigación y medios de implementación.

El eje de adaptación viene a contribuir directamente a la actualización y creación de planes de adaptación al CC. El PANCC II considera cinco sectores nuevos: Ciudades, infraestructura, energía, turismo y recursos hídricos, sumándose a los cuatro establecidos por el PANCC I.

Por lo tanto, se debe tener en cuenta que a través del PANCC nace el Plan Nacional de Adaptación (PNA), el cual constituye el instrumento articulador de la política pública chilena en materia de adaptación al cambio climático. Los objetivos generales del PNA son: 1) Establecer el marco conceptual para la adaptación en Chile, 2) Establecer el marco institucional bajo el cual operará el Plan Nacional de Adaptación y los planes sectoriales, 3) Establecer y actualizar los sectores que requieren planes de adaptación y establecer los criterios y lineamientos para su elaboración e implementación y 4) Definir las acciones transversales a los sectores, necesarias para la adaptación al cambio climático. El plan propone 27 medidas transversales y líneas de acción sectoriales, que corresponden a los nueve planes específicos para los sectores priorizados. (MMA, 2017).

A continuación, la Figura 6 resume la interacción de los conceptos mencionados:

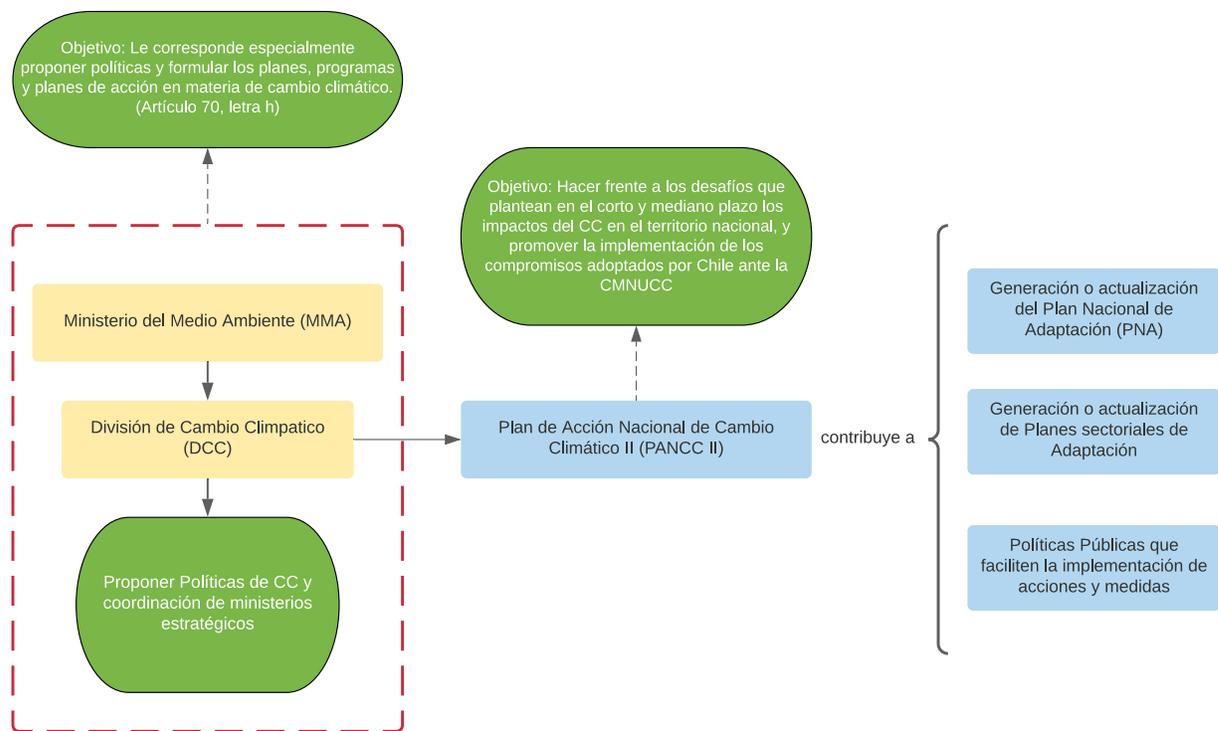


Figura 6: Esquema general de generación de planes de acción y adaptación al Cambio Climático en Chile. Fuente: Elaboración propia.

### 2.4.3. Estructura del PANCC

Como se ha expuesto, el Plan Nacional de Adaptación y los Planes Sectoriales de Adaptación (principales instrumentos de política pública de CC en Chile) surgen de los Planes de Acción Nacional de Cambio Climático. El PANCC II define tres ejes principales: Adaptación, Mitigación y Medios de implementación. Para cada uno de estos pilares se definen los objetivos generales y específicos para lograr así la mitigación y/o adaptación al CC de diversos sectores.

Considerando el eje de adaptación, el PANCC II señala como objetivo general: Fortalecer la capacidad de Chile para adaptarse al cambio climático profundizando los conocimientos de sus impactos y de la vulnerabilidad del país y generando acciones planificadas que permitan minimizar los efectos negativos y aprovechar los efectos positivos, para su desarrollo económico y social y asegurar su sustentabilidad, velando por conservar su patrimonio natural y cultural (MMA, 2017). Para ello, se definen los siguientes objetivos específicos (MMA, 2017):

1. Evaluar periódicamente la vulnerabilidad de sistemas humanos y naturales frente a los impactos del cambio climático, estableciendo los riesgos y oportunidades que presenta este fenómeno.
2. Adaptarse al cambio climático, mediante la implementación de medidas dirigidas a reducir la vulnerabilidad y aumentar la capacidad adaptativa de los sistemas humanos y naturales del país.
3. Monitorear y reportar periódicamente el avance de la adaptación en el país, para establecer mejoras en la planificación mediante políticas de adaptación.

Para alcanzar cada uno de los objetivos específicos, el PANCC define las líneas de acción (LA) requeridas.

Se debe tener en consideración que, el estudio del riesgo climático de un sector está estrechamente relacionado con el primer objetivo específico del eje adaptación, por lo tanto, se profundizará en las implicancias de este punto.

Dicho punto requiere de la identificación e implementación de medidas de adaptación al cambio climático, además de un trabajo previo de análisis de los impactos actuales y previstos del cambio climático sobre los distintos sistemas humanos y naturales afectados, los riesgos asociados y la determinación de la vulnerabilidad de dichos sistemas. Con este objetivo específico se quiere mejorar la información disponible respecto de la amenaza del cambio climático, la vulnerabilidad y el riesgo de los sistemas y poblaciones que puedan verse afectados. A su vez, para lograr este objetivo se definen dos líneas de acción (MMA, 2017):

1. Generación, análisis y actualización de información climática.
2. Generación, análisis y actualización de información sobre vulnerabilidad y riesgos frente cambio climático. Haciendo énfasis en esta línea de acción, el PANCC II señala 3 medidas de acción (MA) para lograr dicho punto:
  1. Mejorar la información sobre el riesgo de eventos hidrometeorológicos extremos para la adaptación al cambio climático.
  2. Evaluar los riesgos de sistemas naturales y humanos frente a los impactos del cambio climático, que permitan priorizar las áreas y sectores críticos, para ser incorporados oportunamente en la planificación.
  3. Generar y actualizar mapas de vulnerabilidad en el territorio nacional.

Los productos de la segunda línea de acción y sus medidas respectivas, serán insumos para la revisión de las prioridades del país respecto de la adaptación, la evaluación de la efectividad de las medidas de adaptación en implementación y la elaboración y actualización de planes sectoriales de adaptación. El esquema presentado en la Figura 7 resume la interacción de los conceptos presentados.

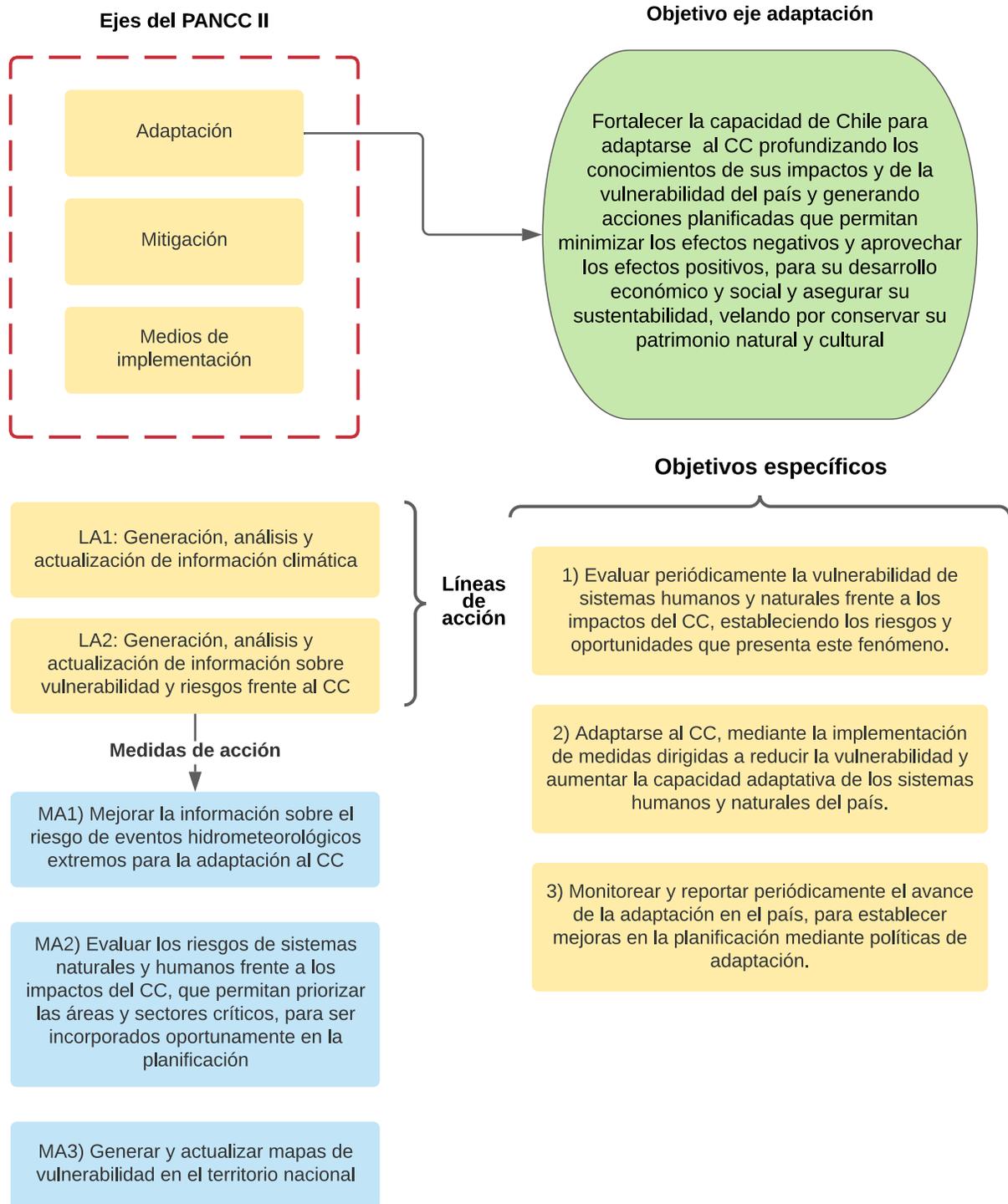


Figura 7: Estructura general del PANCC II, considerando el eje adaptación. Fuente: Elaboración propia.

## 2.5. Problemática

La problemática es abordada desde una perspectiva de políticas públicas y el consecuente plan de adaptación sectorial necesario para enfrentar el cambio climático.

El actual PANCC II considera un total de nueve planes de adaptación sectoriales:

- Silvoagropecuario
- Biodiversidad
- Pesca y Acuicultura
- Salud
- Servicios de Infraestructura
- Ciudades
- Energía
- Turismo
- Recursos hídricos

Los sectores abordados son prioritarios y, por lo mismo, son relevantes económica y socialmente. A pesar de esto último, y dado los antecedentes que han sido entregados, falta un sector que económicamente es uno de los primordiales para Chile: la minería, el cual hasta la fecha no cuenta con un plan de adaptación para enfrentar el cambio climático.

De hecho, el Cuarto informe bienal de actualización de Chile sobre Cambio Climático publicado en 2020, señala que existen importantes brechas y barreras para crear planes de adaptación en minería, indicando al sector con una alta prioridad para subsanar dichas falencias. En la siguiente Tabla 1, se expone en detalle lo mencionado:

Sector	Brecha	Barrera	Necesidad	Prioridad
Minería	Se necesita de manera urgente estudiar, analizar e identificar las vulnerabilidades del sector minero nacional, respecto al uso y consumo de recursos hídricos, huella de carbono y a la gestión de depósitos de relaves. No existen estudios en la materia que permitan avanzar en el plan de adaptación sectorial (MMA, 2020).	Recursos financieros para realizar el diagnóstico inicial y que permita avanzar en el plan de Adaptación (MMA, 2020).	Financiamiento que permita desarrollar un Plan de Adaptación del sector minero (MMA, 2020).	Muy Alta (MMA, 2020)

*Tabla 1: Brechas, barreras y necesidades para el sector minero en materia de adaptación. Fuente: Elaboración propia, a través de la información del 4to informe bienal del MMA, 2020.*

Considerando la tabla anterior, se destaca la urgencia señalada en la brecha existente respecto a estudiar, analizar e identificar las vulnerabilidades del sector minero nacional. Esto último, tiene una estrecha relación con la segunda y tercera medida (MA) de la segunda línea de acción del eje de adaptación del PANCC II. Ver en la Figura 8 la línea punteada de color azul:

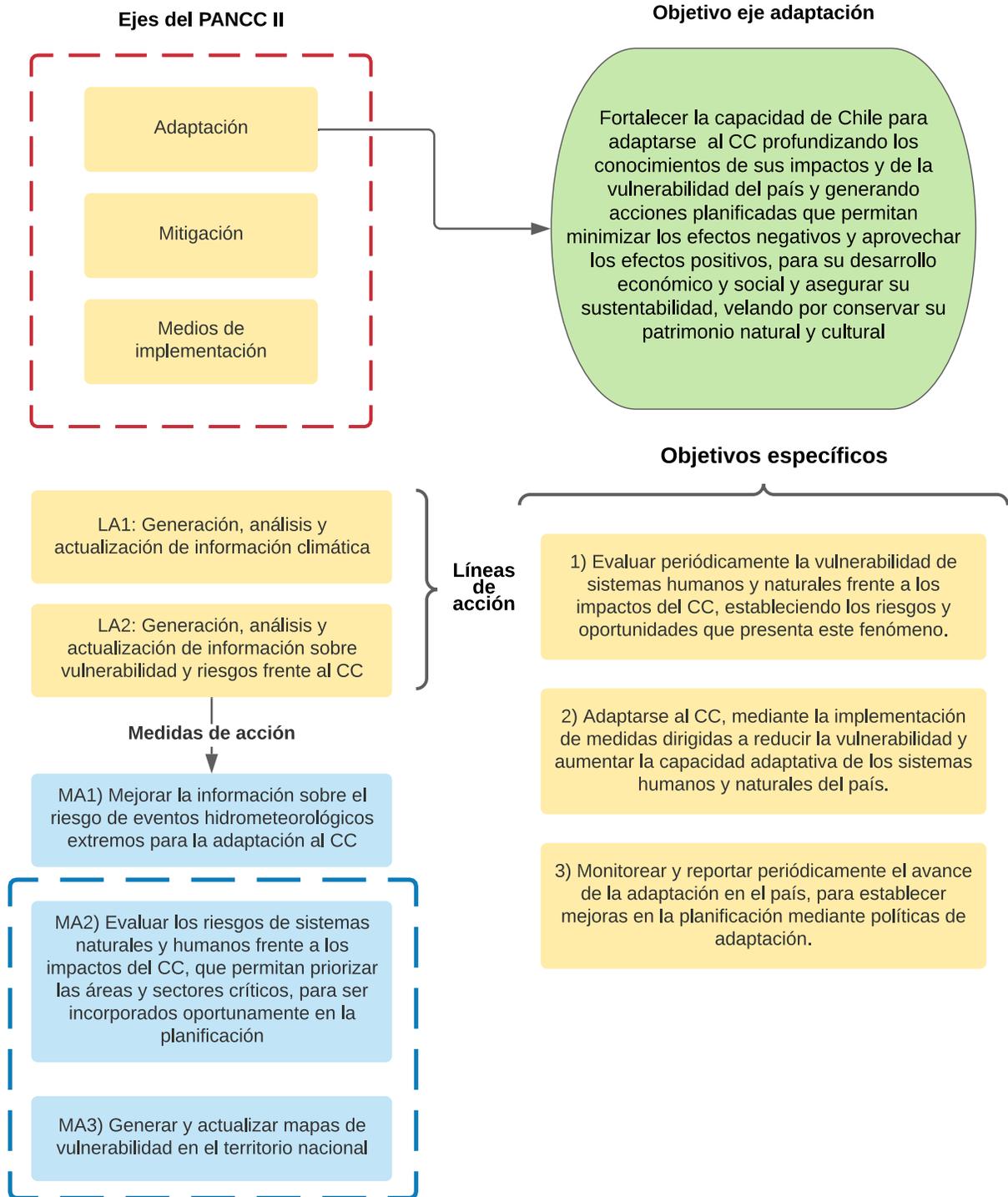


Figura 8: Estructura general del PANCC II, considerando el eje adaptación. Se destaca en línea punteada azul las medidas de acción necesarias para elaborar plan de adaptación del sector minero. Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto, considerando la tabla y la figura expuestas, se puede concluir que el estudio de las vulnerabilidades del sector minero respecto al cambio climático cumple un rol relevante para la elaboración de un plan de adaptación sectorial para la minería.

Además, tal y como se mencionó anteriormente, el estudio de la vulnerabilidad tiene como fin principal la definición de prioridades dentro del sector, para así elaborar una correcta estrategia de adaptación al cambio climático.

Por otro lado, la tercera medida de acción indica la “necesidad de generar y actualizar mapas de vulnerabilidad en el territorio nacional” (Ver Figura 8). Lo anterior, hace referencia a que se requiere visualizar de forma simple los territorios más vulnerables, y de esa manera priorizar zonas (regiones y/o comunas) que necesiten de manera más urgente la implementación del plan de adaptación sectorial al cambio climático.

Con los antecedentes recién expuestos, es evidente la necesidad de estudiar la vulnerabilidad del sector y que además pueda ser visualizados en mapas que faciliten la comprensión de las zonas más vulnerables, y así contribuir con uno de los puntos necesarios para la creación de un plan de adaptación para el sector minero.

## **2.6. Riesgo y vulnerabilidad**

En las líneas de acción se ha mencionado la importancia y necesidad del estudio de la vulnerabilidad para el sector minero. Esto último viene dado porque el PANCC fue elaborado en base a las especificaciones hechas por el cuarto informe del IPCC (AR4), en el cual se establece a la vulnerabilidad como el factor objetivo a determinar en materia de cambio climático.

Pero de acuerdo con lo que señala Giz and Eurac (2017), en el quinto informe del IPCC (AR5) hay una actualización de los conceptos, en cual se establece que el factor objetivo a determinar no es la vulnerabilidad, sino que el riesgo.

Desde el punto de vista del AR4, la vulnerabilidad se compone de la exposición, impactos potenciales, sensibilidad y la capacidad adaptativa que posea un sector. Bajo la nueva perspectiva definida por el AR5, el riesgo es el factor a determinar y está compuesto por la amenaza, exposición y vulnerabilidad (Ver Figura 9).

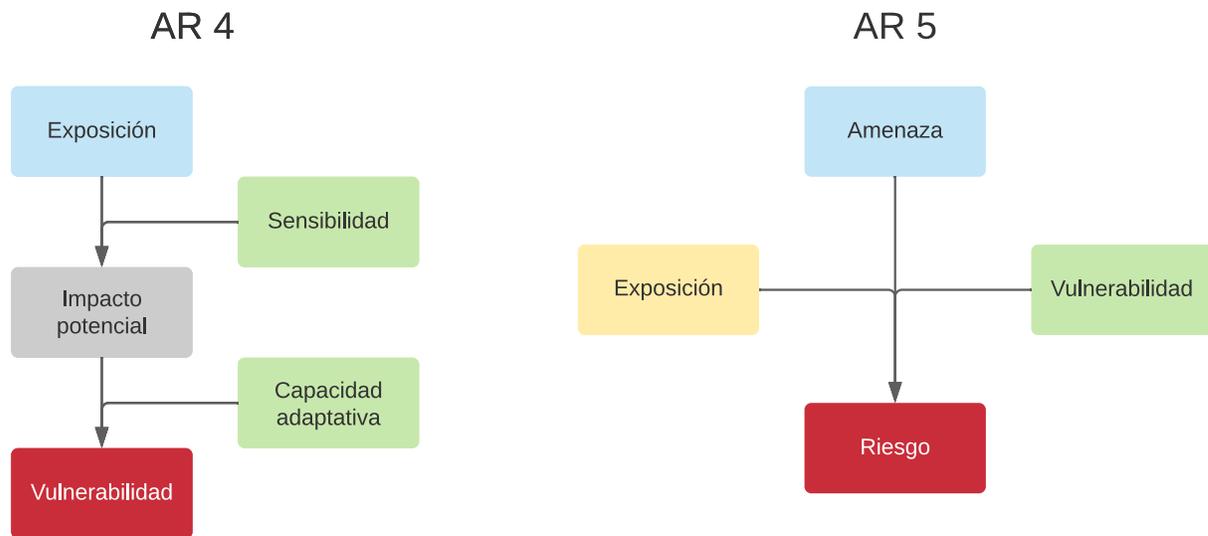


Figura 9: Diferencias entre AR4 y AR5. Fuente: IPCC, 2014.

### 3. Objetivos y alcances

En consecuencia con la anterior, en el presente trabajo se establece que el riesgo asociado al clima es el factor esencial de estudio, utilizando a la vulnerabilidad como uno de sus componentes esenciales.

El estudio del riesgo climático y la generación de mapas de riesgo contribuyen a la priorización de sectores que, posteriormente, permitirá la creación de un plan de adaptación para el sector minero.

Por lo tanto, se establece el siguiente objetivo para el presente trabajo:

“Determinar riesgos climáticos en el sector minero del cobre de la Región de Antofagasta, estableciendo sus vulnerabilidades, exposición y amenazas, y representado estas componentes en mapas de riesgos climáticos, sirviendo esto de insumo para la generación de un plan de adaptación para el sector minero”.

#### 3.1. Objetivos específicos

Para lograr el objetivo planteado, se considerarán los siguientes objetivos específicos:

1. Determinar las amenazas Climáticas que afectarían al sector minero de Antofagasta, cuantificando el impacto con las métricas adecuadas.
2. Proponer la Cadena de impacto del sector minero para cada subcomponente, indicando el riesgo climático que se espera entregar.
3. Determinar factores de Exposición y Vulnerabilidad de los sistemas de estudio
4. Cuantificar el riesgo y visualizarlo en mapas de riesgo climático

## 3.2. Alcances

### 3.2.1. Subcomponentes mineros consideradas

Dentro del contexto en cual está inserto la minería, se hallan diferentes componentes que pueden verse afectado por algún tipo riesgo. El sistema minero abarca cinco componentes: Productiva (faena minera), Medioambiente local, comunidades, Institucionalidad local y cadena de suministro (Dreyfus, J., 2021).

Dado la complejidad que involucra analizar el riesgo para la totalidad del sistema, se acotarán los alcances a la componente productiva, dicho en otras palabras, faenas mineras.

Se define una faena minera como el conjunto de actividades, y/o procesos productivos internos de una empresa minera durante la etapa de operación de esta, que tienen la finalidad de generar un producto comercializable a partir del mineral de cobre extraído de un yacimiento (Dreyfus, J., 2021).

A continuación, se definen los subcomponentes principales de las faenas mineras (Dreyfus, J., 2021):

- **Subcomponente explotación mina:** Agrupa los elementos propios del área mina de una faena, en la cual se desarrollan principalmente actividades de extracción del mineral según el tipo de yacimiento y sus características.
- **Subcomponente plantas de procesamiento y beneficio:** Agrupa los elementos propios del área beneficio y transformación del mineral, donde este es procesado hasta la obtención de uno o varios productos comercializables. En este subcomponente, se destaca la posibilidad de que la unidad de fundición y refinería sea compartida con distintas faenas del sector, o sea una unidad externa a la faena, parte de la cadena de suministros y servicios.
- **Subcomponente depósitos residuos mineros masivos (RMM):** Agrupa los elementos propios del acopio de residuos productivos de gran escala, que son potencialmente riesgosos para el entorno. Estos pueden ser sistemas activos de descarte, ósea operacionalmente funcionales, o elementos pasivos, ósea operacionalmente inactivos.
- **Sub componente obras portuarias:** Agrupa elementos propios del área costera de una faena minera, principalmente actividades de comercialización para productos e insumos, almacenamiento temporal, extracción y/o tratamiento de agua de mar, entre otros. En este subcomponente, se destaca la posibilidad de que tanto la unidad puerto como la unidad sistema de impulsión y/o desalinización de agua de mar sean unidades compartidas por diferentes faenas u otros sectores productivos, además de la posibilidad de ser unidades externas a la faena.
- **Subcomponente transporte estratégico:** Agrupa distintas actividades de transporte estratégico del proceso minero. En esta componente se consideran distintos modos de transporte, ya sea transporte de personal, material y elementos estratégicos que poseen una forma de transporte distinta por lo general.

Cabe señalar que se analiza el riesgo relacionado para tres subcomponentes definidas: explotación mina, plantas de procesamiento y depósitos RMM. Dado la disponibilidad de instalaciones que se encuentran en la base de datos utilizada, el riesgo para el subcomponente transporte estratégico no es analizado. Esto último también excluye el estudio de los depósitos de relave. De todos modos, se considera una nueva categoría llamada “instalaciones de apoyo”, la cual reúne las instalaciones del tipo bodegas u oficinas y que también incluye el subcomponente obras portuarias.

Por lo tanto, los subcomponentes que son analizados en el presente trabajo corresponden a:

- Explotación mina
- Plantas de procesamiento
- Depósitos de residuos mineros masivos (RMM)
- Instalaciones de apoyo

Además, el sector de estudio se acotará a la región de Antofagasta debido a que esta zona aporta con el 54% de la producción nacional, equivalente al 15% de la producción del cobre mundial. Siguiendo la misma línea, en el presente trabajo se limita el análisis a la minería del cobre ya que es el principal recurso que Chile exporta, alcanzando el 91.1% de las exportaciones mineras del año 2020 (Ver Figura 10).

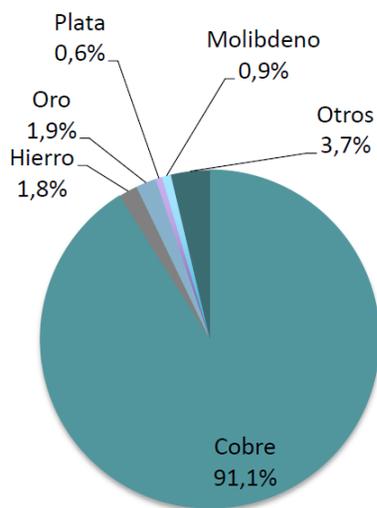


Figura 10: Composición de las exportaciones mineras. Fuente: Consejo Minero a partir de información del Banco Central de Chile. 2019.

## 4. Marco Conceptual

### 4.1. Caso internacional

En el ámbito internacional ya se han implementado medidas y herramientas que establecen el riesgo climático y que contribuyen a la toma de decisiones y adaptación dentro del contexto minero. De acuerdo con la guía de Adaptación al Cambio Climático para la industria minera (*Adapting to Climate Change: A guide for the Mining Industry*, en inglés), se establece que compañías líderes ya han desarrollado e integrado sofisticadas estrategias de adaptación que desde una perspectiva comprensiva ayudan a las organizaciones a gestionar el riesgo e identificar oportunidades (Nelson and Schuchard, 2011).

Junto con establecer sistema de gestión de riesgos asociados al clima, ciertas empresas han utilizado modelamiento científico con una perspectiva regional para identificar y cuantificar riesgos físicos y oportunidades a nivel local. Esto último implica que utilizar modelos climáticos globales en localizaciones donde hay probabilidad de impactos es relevante para la creación de planes de adaptación. A continuación, se presentan cuatro casos (Nelson and Schuchard, 2011):

- **Anglo American:** Condujo un proyecto de evaluación de impacto desde el 2008 al 2009 con el Imperial College London, para modelar probables cambios en temperatura y precipitaciones que pueden amenazar a sus operaciones. Las predicciones individuales para cada sitio ayudaron a la compañía a crear un inventario de riesgo para operaciones actuales y futuras, y desarrollar estrategia de adaptación local para fortalecer la resiliencia climática de estas operaciones y sus regiones aledañas.
- **Exxaro:** Utilizó modelos de circulación general a escala, para estimar impactos de cambio climático para las operaciones y comunidades donde los empleados están localizados. El estudio examinó amenazas climáticas y vulnerabilidades inherentes a la infraestructura existente, población y actividades socioeconómicas.
- **Vale:** Encargó al Instituto Espacial Nacional de Brasil a evaluar la vulnerabilidad bajo diferentes escenarios climáticos en el norte y sur de Brasil y sus efectos en factores como disponibilidad de agua y biodiversidad.
- **Corporación Newmont Mining:** El grupo medioambiental y responsabilidad social de la minera trabajó en identificar y evaluar otros riesgos que no tienen un riesgo financiero inmediato, pero que pueden afectar al negocio en otras formas.

Otras compañías, en tanto, modificaron el proceso de identificación de riesgo para incluir riesgos climáticos y oportunidades (Nelson and Schuchard, 2011):

- **HudBay Minerals:** Identifica riesgos de cambio climático como parte de su implementación de sistemas de gestión ambiental y estándares como el ISO 14001 en sus operaciones subsidiarias.
- **Norsk Hydro:** Incorpora riesgos climáticos en sus estándares sociales y en proceso de evaluación de riesgo ambiental.

Los casos expuestos indican antecedentes a nivel de empresas respecto a la adaptación al cambio climático. Pero para el presente trabajo, se debe tener en consideración los antecedentes que involucran un estudio a nivel sectorial más que puntual.

De manera más amplia, la organización sin fines de lucro Urban Land Institute (ULI), la cual tiene oficinas en Washington, D.C., Hong Kong y Londres, en el 2015 diseñó una guía para evaluar el riesgo del cambio climático (“A Guide for Assessing Climate Change Risk”, en inglés). El documento ofrece un marco metodológico analítico que considera los tipos de riesgos, activos que necesitan protección, y los posibles daños que una ciudad puede enfrentar, resultando una guía que puede ser usada para establecer prioridades para desarrollar estrategias resilientes e implementar proyectos. El trabajo está dirigido principalmente para los tomadores de decisión de ciudades y gobiernos locales (ULI, 2015).

Esta guía ofrece 6 pasos que tienen como principal resultado una cuantificación estimada de los daños de los distintos eventos climáticos (o no climáticos), asociada a un valor monetario. Es en base a esto último que se evalúa la prioridad para realizar alguna política de adaptación.

## **4.2. Contexto nacional**

El estudio “Gestión de Cambio Climático en la Minería del Cobre en Chile” desarrollado por Alta Ley en el 2019, realizó entrevistas con seis empresas responsables del 85% de la producción nacional de cobre, lo que, complementado con reportes de sustentabilidad, consumo de agua y energía y otros, hizo un levantamiento de iniciativas y compromisos del sector minero nacional en materia de cambio climático.

Del levantamiento se encontró que el 100% de las empresas entrevistadas posee una estrategia, estándar o política de sustentabilidad, destacando que todas estas estrategias o políticas consideran en algún nivel el cambio climático, principalmente en mitigación y algunas adaptación.

Se concluye del estudio que las empresas están al tanto de la existencia de algunos riesgos asociados al cambio climático. Sin embargo, solo dos de ellas poseen un mecanismo formal y detallado de evaluación y gestión de riesgos climáticos, que incluyen análisis de escenarios futuros de disponibilidad hídrica, precipitaciones, etc. (Alta Ley, 2019)

### **4.2.1. Atlas de Riesgo Climático: ARClim**

A nivel nacional, sobresale el Atlas de Riesgo Climático (ARClim), el cual es un proyecto del Ministerio del Medio Ambiente del Gobierno de Chile, desarrollado por el Centro de Investigación del Clima y la Resiliencia (CR2) y el Centro de Cambio Global (CCG-Universidad Católica de Chile) con la colaboración de otras instituciones nacional e internacionales.

El objetivo general de ARClim es desarrollar un conjunto de mapas de riesgos relacionados con el cambio climático para Chile. ARClim incluye diversos sectores con cobertura nacional y detalle comunal o puntual, convirtiéndose así en una herramienta importante para el diseño de políticas públicas y la implementación de medidas y planes de adaptación (ARClim, 2020).

Para el uso de estos mapas, el proyecto ideó una plataforma web de libre acceso, en la cual se puede estudiar de manera dinámica los riesgos climáticos asociado a diferentes fenómenos (amenazas) para 12 sectores económicos y sociales, exceptuando minería. En consecuencia, esta plataforma en sí es un insumo que contribuye a la creación de planes y políticas de adaptación.

De hecho, el ministro de Ciencia y Tecnología, Andrés Couve, afirmó que el Atlas de Riesgo Climático es el mejor ejemplo de cómo la evidencia científica se pone al servicio de la toma de decisiones climáticas, las que serán esenciales para la política pública y también para el sector productivo (El Mostrador, 2020).

Se espera que la plataforma permita que todos los actores involucrados puedan tomar mejores decisiones de operación y considerar mejoras y nuevos diseños, teniendo en cuenta las protecciones asociadas a cada sector y comuna en específico. En ese sentido, la ministra Carolina Schmidt, afirmó que “es relevante (el proyecto ARClím) para descentralizar las decisiones y que cada territorio pueda adaptarse a las mejores condiciones para disminuir su riesgo climático” (El Mostrador, 2020).

ARClím utiliza la metodología propuesta por GIZ and Eurac, 2017, determinando los 3 factores que componen el riesgo: Amenaza, Exposición y Vulnerabilidad, y así construir 52 cadenas de impacto que son visualizadas en mapas geográficos. Han sido 11 los sectores estudiados:

- Agricultura
- Salud y bienestar Humano
- Bosques Nativos
- Acuicultura
- Infraestructura Costera
- Recursos Hídricos Turismo
- Pesca Artesanal
- Biodiversidad
- Plantaciones Forestales
- Energía Eléctrica

Para cada sector se estudiaron diferentes riesgos asociados a amenazas específicas. A modo de ejemplo, para la Agricultura se elaboraron 14 mapas de riesgo climático:

- Cambio de Productividad Cultivo de Almendro
- Cambio en la capacidad de carga de bovinos de carne
- Cambio en la capacidad de carga de bovinos de leche
- Cambio de productividad cultivo de cerezo
- Cambio de productividad cultivo de frejol
- Cambio de productividad cultivo de maíz
- Cambio de productividad cultivo de Manzano rojo
- Cambio de productividad cultivo de nueces
- Cambio en la capacidad de carga de Ovinos
- Cambio de productividad cultivo de papa bajo riego
- Cambio de productividad cultivo de papa en secano
- Cambio de productividad cultivo de praderas
- Cambio de productividad cultivo trigo bajo riego
- Cambio de productividad cultivo de trigo en secano

Finalmente, considerando tanto la experiencia internacional como nacional, se da cuenta de la existencia y utilidad de herramientas que estiman el riesgo y que en consecuencia contribuyen a una mejor creación de Política Pública de Adaptación al Cambio Climático y apoyan también la toma de decisiones a un nivel sectorial.

## **5. Metodología y datos**

A continuación, se presenta la estructura y los pasos generales de la metodología que se utiliza en el estudio del riesgo climático. Luego, se presentan las fuentes y los datos

### **5.1. Metodología**

Para el desarrollo del trabajo se utiliza la metodología propuesta por Giz and Eurac (2017), la cual indica los pasos a seguir para determinar las tres componentes generales del riesgo, y luego culminar con la estimación de éste, y es elaborada de acuerdo con el 5to informe hecho por el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC) en el año 2014.

Para ayudar a determinar el riesgo, la metodología propone utilizar las cadenas de impacto y así dar un sentido lógico a las interacciones entre los factores mencionados. Además, establece las definiciones de los indicadores para cuantificar la componentes. Por otro lado, la visualización de estos factores se hace a través de mapas de colores que indican el grado de amenaza, exposición, vulnerabilidad o amenaza. Finalmente, de acuerdo con la metodología, las fuentes de datos son de carácter público y de libre acceso. Entonces, se utiliza principalmente datos provenientes de los repositorios del Gobierno de Chile.

A continuación, se detalla lo anteriormente mencionado.

#### **5.1.1. Cadenas de impacto**

Las cadenas de impacto son fundamentales para articular las componentes del riesgo. Dicho de otro modo, es un hilo conductor que une cada uno de los conceptos y establece su relación e interacción.

De acuerdo con Giz and Eurac (2017), una cadena de impacto es una herramienta analítica que ayuda a un mejor entendimiento, sistematiza y prioriza los factores que conducen al riesgo del sistema de interés. La estructura de la cadena de impacto se desarrolla acorde con el quinto reporte del IPCC. (ver Figura 11).

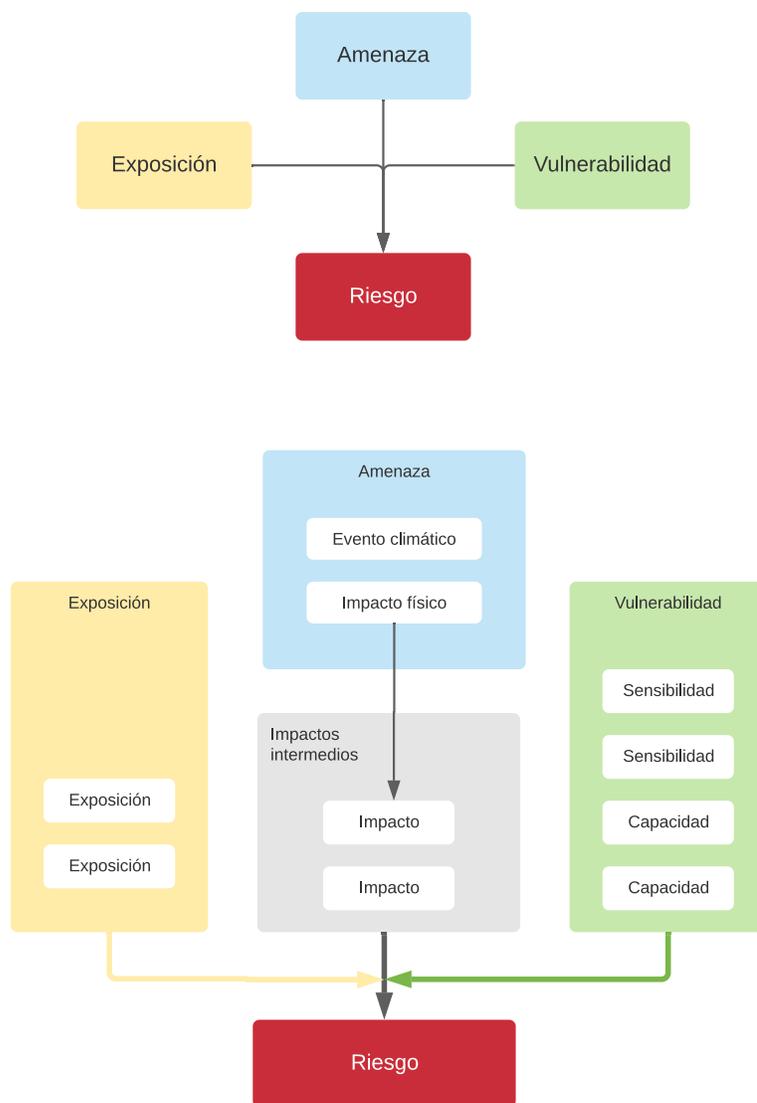


Figura 11: Estructura de una cadena de impacto acorde con el quinto informe del IPCC. Vista general (arriba) y estructura detallada (abajo). Fuente: Elaboración propia, a través de los esquemas de GIZ and Eurac, 2017

Una cadena se construye en base a los componentes del riesgo (amenaza, vulnerabilidad y exposición) y factores subyacentes (en la figura se representan por cajas blancas). El componente de la amenaza incluye factores relacionados a eventos climáticos e impactos físicos directos. La vulnerabilidad consiste en factores de sensibilidad y capacidad. Por otro lado, la exposición se constituye por uno o más factores de exposición del sistema en cuestión (Ver sección Conceptos claves).

Es importante señalar que para cada sistema a estudiar se construye una cadena de impacto de acuerdo con un riesgo climático específico. En este caso, los sistemas de interés son los 4 subcomponentes pertenecientes a las faenas mineras: Plantas de procesamiento, Explotación mina, Depósitos de Residuos Mineros Masivos e Instalaciones de apoyo.

### 5.1.2. Indicadores

La metodología señala que para la estimación del riesgo se deben utilizar indicadores. Esto último tiene como principal objetivo cuantificar los factores que lo componen (vulnerabilidad, exposición y amenaza).

Además, los indicadores deben cumplir las siguientes características (GIZ, 2014):

- Es válido y relevante, es decir, representa bien el factor que se quiere determinar
- Es de confianza, creíble y también permite adquisición de datos para el futuro
- Tiene un significado preciso
- Tiene una dirección clara, es decir, un incremento en el valor es claramente positivo o negativo en relación con el factor de estudio
- Es práctico y alcanzable, es decir, es proveniente de una base de datos accesible
- Es apropiado, lo que quiere decir que la resolución temporal y espacial es correcto respecto a los factores

A continuación, se presenta una tabla que contiene ejemplos de indicadores:

Componente del riesgo	Factor	Posible indicador
Amenaza (evento climático)	Precipitaciones extremas	Número de días por año en que la lluvia supera los 50mm
Amenaza (Impacto físico directo)	Inundaciones	Número de eventos de inundaciones desastrosas en un año.
Vulnerabilidad (sensibilidad)	Hectáreas utilizadas propensas a la erosión	% de clases de hectáreas con alto riesgo de erosión
	Pendientes pronunciadas	% de pendientes pronunciadas con un gradiente mayor al 30%
Vulnerabilidad (Capacidad)	Pobreza	% de personas que viven con menos de US\$ 2 por día
Exposición	Densidad de la población	Número de habitantes por KM2

Tabla 2: Ejemplo de factores y posibles indicadores. Fuente: GIZ and Eurac, 2017

Finalmente, los indicadores deben ser normalizados a una escala común para todos los factores. Éstos deben ir desde 0 (óptimo, lo que quiere decir que no hay nada que mejorar o no es posible) hasta 1 (crítico, el sistema está severamente afectado) (GIZ and Eurac, 2017).

Los valores normalizados tendrán un significado que cuantificarán el estado del sistema según los factores, en una escala común (de 0 a 1). Además, esto último permitirá una interacción matemática más simple en comparación con indicadores con diferentes escalas numéricas.

Por lo tanto, para cada uno de los componentes del riesgo se establecerán indicadores que cumplan las condiciones mencionadas por esta metodología.

### 5.1.3. Visualización de los componentes

Tanto el riesgo como sus componentes (amenazas, exposición y vulnerabilidades), son trabajados y visualizados en una escala territorial de 25 km<sup>2</sup>. Esto último quiere decir que las amenazas, exposición y vulnerabilidades son determinadas píxel por píxel, los cuales representan tienen una dimensión de 5 x 5 km.

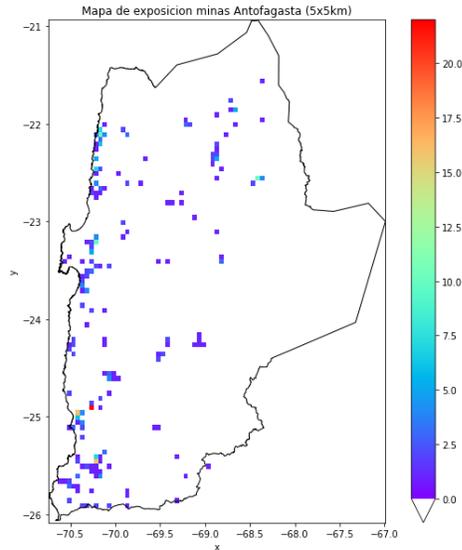


Figura 12: Grilla de 25 km<sup>2</sup> de minas en Antofagasta. Fuente: Elaboración propia.

A modo de ilustración, en la figura se pueden apreciar los pixeles que representan la cantidad de minas en una superficie de 25 km<sup>2</sup>. Por lo tanto, se debe tener en cuenta que la vulnerabilidad/amenazas/exposición se estudiará a ese nivel de superficie, lo que conlleva a un análisis más detallado. Además, los índices climáticos por defecto ya vienen en la resolución mencionada, entonces llevar a cabo el resto del estudio a la misma escala facilita la interacción entre las componentes.

#### 5.1.4. Representación del riesgo

Como se ha mencionado, el riesgo viene dado por la interacción de las amenazas, vulnerabilidades y exposición. Tomando en cuenta que los índices de cada factor son valores numéricos entre 0 y 1, el índice del riesgo asociado al clima se define como el promedio de cada uno de los factores:

$$R = \frac{(A + V + E)}{3}$$

Ecuación 1: Cálculo del riesgo climático

Se considera de esta manera, ya que se toma el supuesto de que los tres factores que componen el riesgo tienen la misma importancia y por ende poseen igual ponderación. Esta operación entrega un índice entre 0 y 1, siendo 0 la representación de riesgo nulo o no medición, mientras que el valor 1 indica un muy alto riesgo. La siguiente tabla muestra la representación de riesgo según el rango del índice:

Nivel de riesgo	Valor del índice
Muy bajo	0 a 0.199
Bajo	0.2 a 0.399
Mediano	0.4 a 0.599
Alto	0.6 a 0.799
Muy alto	0.8 a 1

Tabla 3: índice y niveles de riesgo. Fuente: Elaboración propia.

## 5.2. Datos

De acuerdo con la metodología, se hace un fuerte hincapié en que los datos utilizados para determinar el riesgo climático de un sistema sean de fácil acceso (generalmente de repositorios de datos públicos). Por lo tanto, la data utilizada proviene principalmente de repositorios puestos a disposición por el Gobierno de Chile. En total se extraen siete bases de datos, la cuales son usadas para el desarrollo del presente estudio (Ver Tabla 4)

Nombre	Descripción	Uso	Fuente	Link
Catastro de faenas en Chile	Contiene un catastro georreferenciado de distintas instalaciones mineras. Reúne información respecto a la empresa a la que pertenecen, tamaño de la mina, tipo de mineral producido, etc.	Son utilizados para determinar la exposición y ciertos factores de vulnerabilidad.	Ministerio de Minería	<a href="https://datos.gob.cl/dataset/faenas-en-chile">https://datos.gob.cl/dataset/faenas-en-chile</a>
División regional: polígonos de las regiones de Chile	Mapa vectorial en formato shape (.shp) que contiene los polígonos que definen los límites geográficos de las regiones del país.	Se utilizan para elaboración de mapas de exposición, vulnerabilidad y amenaza.	Biblioteca del Congreso Nacional (BCN)	<a href="https://www.bcn.cl/sitios/mapas_vectoriales/index.html">https://www.bcn.cl/sitios/mapas_vectoriales/index.html</a>
División comunal: polígonos de las comunas de Chile	Mapa vectorial en formato shape (.shp) que contiene los polígonos que definen los límites geográficos de las comunas del país.	Se utilizan para la visualización de los factores del riesgo a nivel comunal.	Biblioteca del Congreso Nacional (BCN)	<a href="https://www.bcn.cl/sitios/mapas_vectoriales/index.html">https://www.bcn.cl/sitios/mapas_vectoriales/index.html</a>
Datos grillados de índices climáticos de Chile continental	Archivos en formato .TIFF que contienen información de índices climáticos para el presente y futuro (1980-2010 y 2035-2065, respectivamente) a una resolución de 25 km <sup>2</sup> .	Son utilizados para determinar las amenazas climáticas que podrían afectar a la minería.	Repositorio de datos climáticos de ARClím (Ministerio del Medio Ambiente)	<a href="https://arclim.mma.gob.cl/features/datos_climaticos/">https://arclim.mma.gob.cl/features/datos_climaticos/</a>
Plantas desaladoras georreferenciadas	Archivo que contiene las plantas desaladoras georreferenciadas operativas y futuras que abastecen a la minería	Se utiliza para determinar factor de vulnerabilidad para el riesgo asociado a sequía.	Minería abierta	<a href="https://maps.mineriaabierto.cl/mapa">https://maps.mineriaabierto.cl/mapa</a>
Establecimientos de salud de Chile	Archivo shape (.shp) que posee todos los establecimientos de salud del país georreferenciados	Se usa para determinar factor de vulnerabilidad relacionado con el riesgo de olas de calor	Infraestructura de Datos Geoespaciales (Ministerio de Bienes Nacionales)	<a href="https://www.ide.cl/index.php/salud">https://www.ide.cl/index.php/salud</a>
DEM (Digital Elevation Model) región de Antofagasta	Modelo de elevación digital del suelo (.dem) que contiene las elevaciones de suelo (en metros) del territorio que abarca la región de Antofagasta	Es utilizado para determinar factor de vulnerabilidad asociado a la elevación del terreno	Repositorio de Google Engine. (Datos del satélite Alos Palsar)	<a href="https://developers.google.com/earth-engine/datasets">https://developers.google.com/earth-engine/datasets</a>

Tabla 4: Datos utilizados para el desarrollo del trabajo. Fuente: Elaboración propia.

De los datos mostrados en la tabla, se requiere un mayor entendimiento del “Catastro de faenas en Chile” y los “Datos grillados de índices del clima en Chile continental”.

El catastro de faenas contiene la información principal para la elaboración de mapas de exposición y vulnerabilidad debido a las georreferencias de cada instalación. Además, provee la categoría

(tamaño) y tipo de instalación, lo cual es un insumo clave para los pasos posteriores de la metodología.

Por otra parte, los datos grillados de índices climáticos poseen la información base de la cual se construye la problemática del riesgo. En consecuencia, se requiere profundizar en los detalles que caracterizan dichas bases de datos.

### 5.2.1. Datos catastro de faenas en Chile

El “Catastro de faenas en Chile” contiene 7653 instalaciones mineras de todo el país, incluyendo la ubicación geográfica de la observación. A continuación, se resumen las 24 columnas contenidas en el archivo (Ver Tabla 5):

Nombre columna	Contenido
Este	Coordenada Este
Norte	Coordenada Norte
ID	ID de la instalación
RUT EMPRE	Rut de la empresa dueña de instalación
NOMBRE EM	Nombre de la empresa dueña de instalación
REGION FA	Región donde se ubica la faena
PROVINCIA	Provincia donde se ubica la faena
COMUNA F	Comuna donde se ubica la faena
NOMBRE F	Nombre de la faena a la cual pertenece la instalación
CATEGORIA	Categoría de la instalación
REGION IN	Región dónde se ubica la instalación
PROVINCI	Provincia dónde se ubica la instalación
COMUNA IN	Comuna donde se ubica la instalación
NOMBRE IN	Nombre de la instalación
TIPO INST	Tipo de instalación
RECURSO M	Recurso mineral
RECURSO P	Recurso principal
TIPO RECU	Categoría a la que pertenece el recurso
UTM NORTE	Coordenada UTM Norte
UTM ESTE	Coordenada UTM Este
COTA	Cota de la ubicación
HUSO	Huso de la instalación
DATUM	Formato de coordenadas de la observación
ESTADO	Estado de la instalación: Activo o Inactiva

Tabla 5: Variables de catastro de faenas de Chile. Fuente: Elaboración propia a través del catastro de faenas de Chile.

De la tabla anterior, toman especial relevancia las variables relacionadas con las coordenadas de las instalaciones, el tipo y la categoría a la que pertenece la instalación. Esta información es utilizada para determinar la exposición y vulnerabilidad asociada al tamaño de las faenas.

Se realiza un análisis exploratorio de los datos (EDA) acotado a las observaciones pertenecientes a la región de Antofagasta. Del EDA, se desprende que la comuna con mayor cantidad de instalaciones es Tal-Tal con 516 observaciones, seguido de la comuna de Antofagasta con 375 (Ver Figura 13).

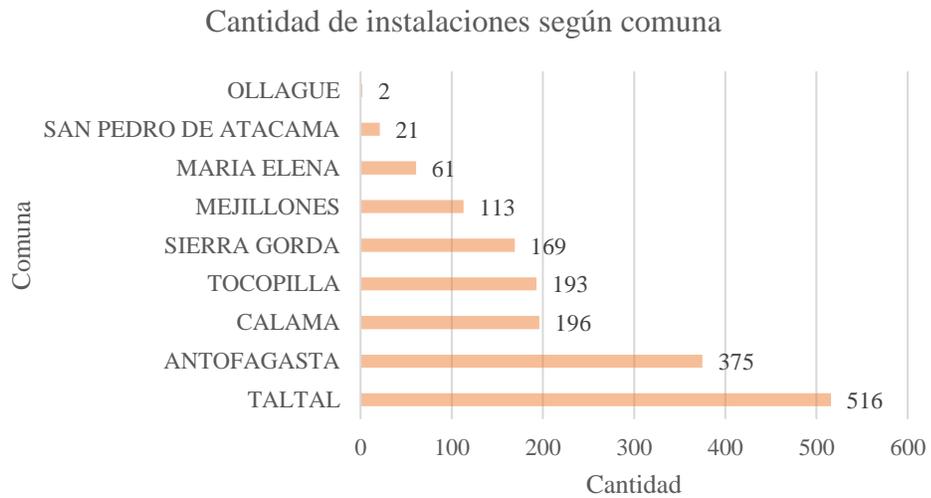


Figura 13: Cantidad de instalaciones según comuna. Fuente: Elaboración propia a través de los datos de catastro de faenas.

Respecto a las instalaciones que se encuentran en la región, se observa que hay 1489 que están activas y 157 no activas (Ver Figura 14). Considerando las minas de rajo abierto y subterráneas, se aprecia que en la gran mayoría de ellas se producen recursos minerales metálicos (Ver Figura 15), siendo el cobre el mineral metálico más producido, destacando de manera robusta por sobre el oro y el hierro. (Ver Figura 16).

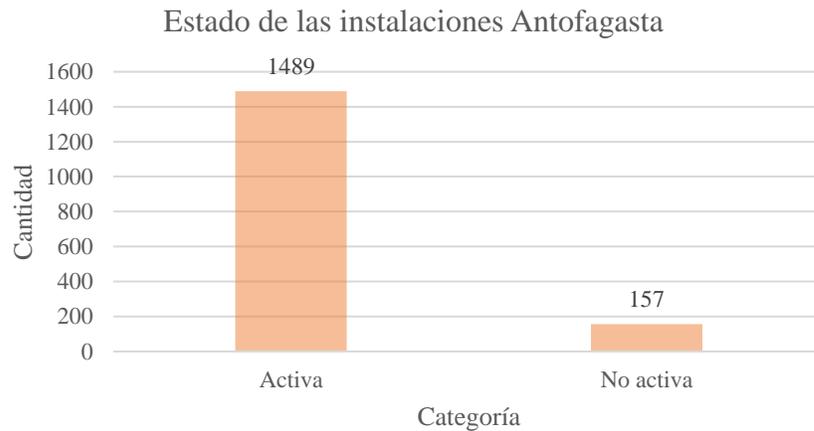


Figura 14: Estado de las instalaciones Antofagasta. Fuente: Elaboración propia a través de los datos de catastro de faenas.

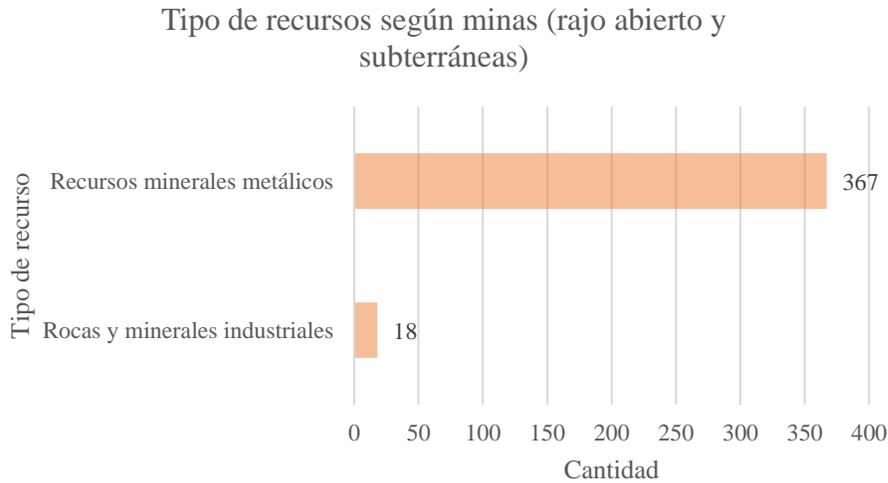


Figura 15: Tipo de recursos según minas (rajo abierto y subterráneas). Fuente: Elaboración propia a través de los datos de catastro de faenas.

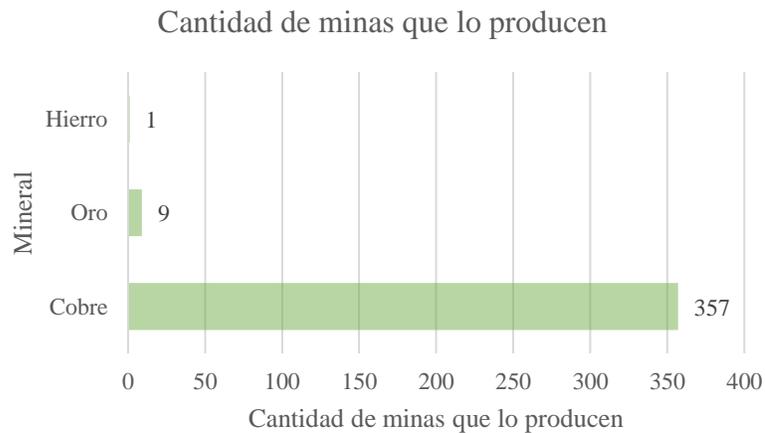


Figura 16: Tipo de mineral metálico producido. Fuente: Elaboración propia a través de los datos de catastro de faenas.

Un parámetro relevante para considerar es la categoría de las minas, las cuales se clasifican según 4 categorías (ARClím, 2020 y Cochilco, 2013):

- **Categoría A:** Cantidad total de horas de trabajo mayor o igual 1.000.000 horas anuales (más de 400 trabajadores)
- **Categoría B:** Cantidad total de horas de trabajo entre 200.000 y 1.000.000 de horas anuales. (entre 80 y 400 trabajadores)
- **Categoría C:** Cantidad total de horas de trabajo entre 30.000 y 200.000 horas anuales. (Menor a 80 trabajadores)
- **Categoría D:** Cantidad total de horas de trabajo menor a 30.000 horas anuales.

Teniendo en mente las 4 categorías mencionadas, en la región de Antofagasta se encuentran 277 mineras categoría D, 40 Categoría tipo C, 37 Categoría A, 13 Categoría B y 18 que no presentan una clasificación específica (Ver Figura 17).

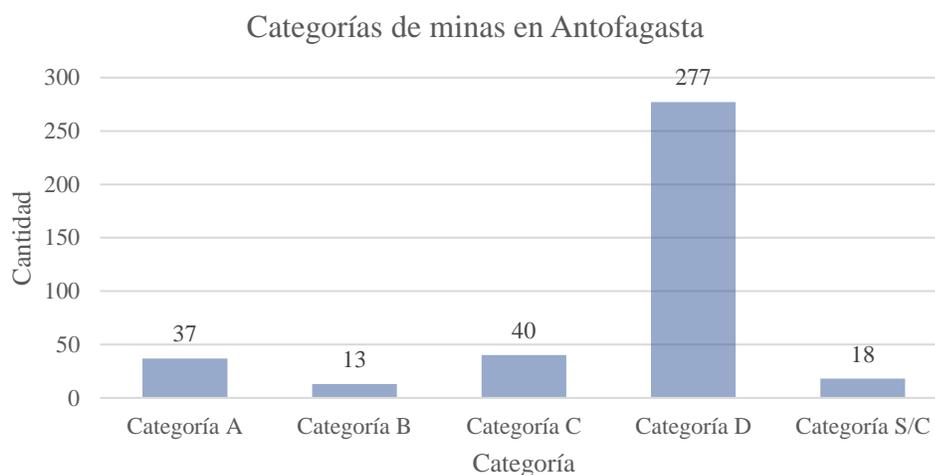


Figura 17: Categorías de minas en Antofagasta. Fuente: Elaboración propia a través de los datos de catastro de faenas.

### 5.2.2. Datos índices climáticos

Los índices climáticos son resúmenes estadísticos que facilitan la comprensión del comportamiento de variables climáticas (como la temperatura o la precipitación) (ARClím, 2020).

Como se mencionó anteriormente, los datos climáticos que se utilizan en este proyecto provienen del repositorio creado por ARClím, el cual cuenta con más de 50 índices climáticos claves (como olas de calor, precipitaciones extremas, frecuencia de sequías, entre otros).

Según las normas climáticas de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA), para el estudio de variables climáticas de alguna zona, se debe utilizar como periodo de referencia un marco de 30 años. Específicamente, los años entre 1980 y 2010. Por lo tanto, los índices climáticos extraídos del repositorio fueron elaborados para un periodo histórico reciente (1980-2010) y un futuro cercano (2035-2065), para todo el territorio nacional continental.

Tanto para el periodo histórico reciente como para el futuro cercano, los datos corresponden a simulaciones realizadas por diferentes tipos de modelos. Para ello, se utilizaron técnicas de regionalización estadística destinadas a corregir Modelos de Circulación Global de la atmósfera (GCMs, por sus siglas en inglés). Esto último fue aplicado a datos provenientes de más de 60 modelos GCMs, calibrándolos con datos de referencia de mayor calidad disponibles en Chile: CR2MET, Explorador Eólico Solar y Reanálisis Europeo ERA-5 (ARClím, 2020). Por lo tanto, tanto para el periodo entre 1980-2010 y el periodo entre 2035-2065, los datos fueron generados a través de simulaciones.

Los datos son desplegados en una grilla de 5x5 km, abarcando un periodo de 100 años (1970 a 2070) en intervalos diarios. A modo de ejemplo, en la Figura 18 se muestra la simulación de la temperatura media anual (°C) para un periodo de 100 años.

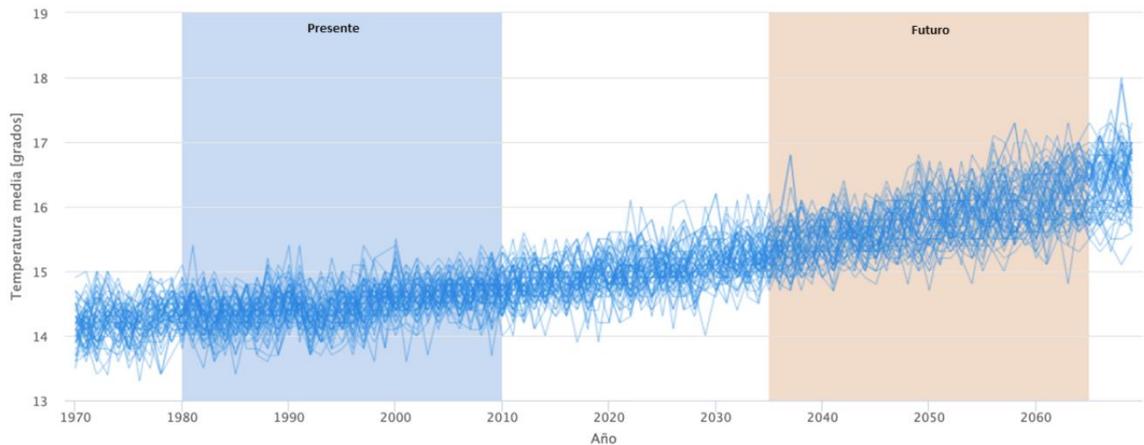


Figura 18: Simulación de la temperatura media anual (°C) para un periodo de 100 años. Destaca con colores los horizontes temporales: Presente (1980-2010) y Futuro (2035-2065). Fuente: Explorador de Amenazas Climáticas, ARClím, 2020.

Como se puede observar, cada línea azul corresponde a la simulación del índice obtenida por un modelo GCM específico. En el pasado reciente, se verificó que las simulaciones reproduzcan el clima observado. Por otro lado, se debe tener en cuenta que el clima futuro no es una predicción sino una proyección basada en un escenario de intensas emisiones de gases de efecto invernadero (RCP8.5) (ARClím, 2020).

Sin embargo, los datos grillados provenientes en el repositorio ARClím no contienen la información de cada simulación ni tampoco los expone a nivel diario, sino que muestra un promedio entre las simulaciones a nivel de periodo. En consecuencia, una grilla de 5x5km del periodo histórico contiene un índice climático que corresponde al promedio del índice climático entre 1980 y 2010. (Ver Figura 19).

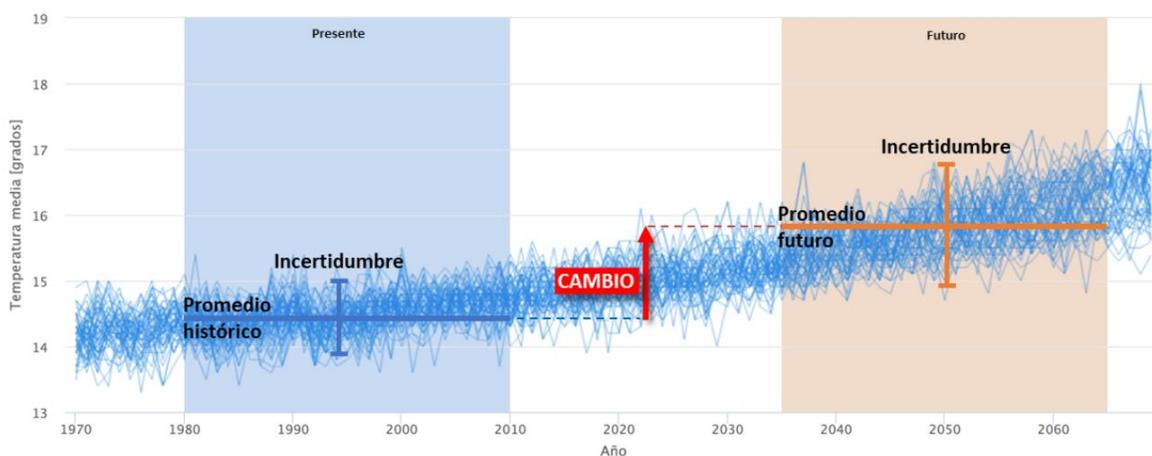


Figura 19: Simulación de la temperatura media anual (°C) para un periodo de 100 años. Fuente: Explorador de Amenazas Climáticas, ARClím, 2020.

La flecha roja contenida en la Figura 19, muestra el cambio del indicador entre el periodo histórico (1980-2010) y futuro (2035-2065), correspondiendo a la diferencia entre el promedio de los índices de cada periodo. Esto último es relevante, ya que este “cambio” se considera como la “amenaza” asociada al cambio climático (ARClím, 2020).

Finalmente, los datos vienen en formato .tiff los cuales pueden ser visualizados con librerías tanto para Python como para R (Ver Figura 20A). Además, cuenta con 3 columnas, 2 relacionadas a coordenadas geográficas (latitud y longitud) y la tercera correspondiente a índice climático en sí (ver Figura 20B).

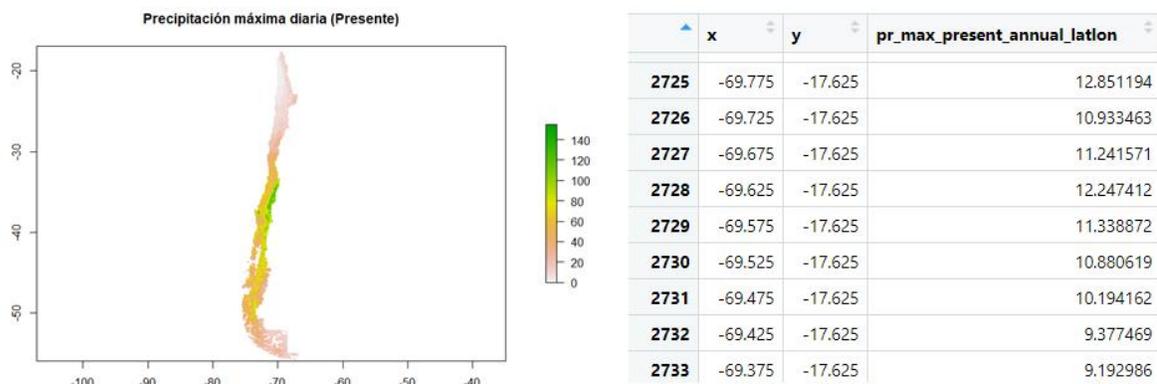


Figura 20: Visualización de mapa de amenaza relacionado a precipitaciones máximas (20A) y tabla de datos del archivo ráster (20B). La columna de la derecha contiene las precipitaciones máximas en mm de agua caída. Fuente: Elaboración propia, a través de los datos.

### 5.3. Secuencia de pasos para estimar riesgo

Finalmente, en base a la metodología propuesta por GIZ and Eurac (2017), se determina el riesgo de acuerdo con la secuencias de pasos:

1. Definir el sistema a estudiar
2. Determinar Amenazas climáticas, sus impactos y riesgos provocados
3. Determinar la exposición del sistema
4. Determinar vulnerabilidades y,
5. Cuantificar el riesgo

## 6. Determinación del sistema y cadenas de impacto: Amenaza, exposición y vulnerabilidades.

A continuación, se entregan los detalles de la determinación de los sistemas de estudio. Luego, se ahonda en la especificación de los componentes de la cadena de impacto (amenaza, exposición y vulnerabilidades), definiendo los indicadores que son utilizados para la estimación del riesgo.

### 6.1. Sistemas y subcomponentes

Como primer paso, se procede a definir los sistemas que son estudiados. Esto consiste en agrupar los tipos de instalaciones provenientes de la base de datos de “catastro de faenas mineras en Chile” descrito en la sección anterior.

Por lo tanto, las diversas instalaciones mineras son clasificadas de acuerdo con la subcomponente (SC) a la que pertenecen (Ver Tabla 6):

SC. Plantas de procesamiento y beneficio	SC. Explotación mina	SC. Depósitos Residuos Mineros Masivos (RMM)	SC. Instalaciones de apoyo
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Planta concentradora</li> <li>• Planta molienda</li> <li>• Planta chancado</li> <li>• Planta de acido</li> <li>• Planta extracción por solventes</li> <li>• Fundición</li> <li>• Planta filtro</li> <li>• Planta dimensionamiento y corte</li> <li>• Planta lixiviación</li> <li>• Refinación electrolítica</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cancha de acopio</li> <li>• Mina subterránea</li> <li>• Mina rajo abierto</li> <li>• Exploración de superficie</li> <li>• Exploración subterránea</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Depósito RMM escoria</li> <li>• Depósito RMM mineral de baja ley</li> <li>• Depósito RMM estériles</li> <li>• Depósito RMM - ripios de lixiviación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Campamento</li> <li>• Polvorín</li> <li>• Talleres y maestranza</li> <li>• Administración – oficina</li> <li>• Puerto de embarque</li> <li>• Concentraducto</li> <li>• Bodega</li> <li>• Muestrera y/o laboratorio</li> <li>• Estación de bombeo</li> <li>• Planta osmosis inversa</li> <li>• Acueducto</li> <li>• Planta captadora de agua de mar</li> </ul>

Tabla 6: Clasificación de instalaciones mineras de acuerdo con subcomponentes de faenas mineras. Fuente: Elaboración propia.

De las instalaciones observadas en la tabla, se destaca la ausencia de los depósitos de relaves. Éstos no se encuentran en la tabla de datos del catastro de faenas y por ende se han dejado fuera del estudio.

La categorización expuesta se realiza considerando la definición de cada sub componente minera, específicamente para las SC. Plantas de procesamiento y beneficio, explotación mina y depósitos de residuos mineros masivos (Para definición de los conceptos, ver sección 3.2.1 ). Además, se hace el supuesto de que las instalaciones que pertenecen a un mismo subcomponente sufrirían consecuencias similares respecto a una misma amenaza. Lo anterior, es para principalmente facilitar el análisis del riesgo en las instalaciones mineras.

En la siguiente figura, se muestra el mapa de la región de Antofagasta que contiene los puntos de los cuatros subcomponentes que son estudiados, identificándolos con diferentes colores (ver Figura 21).

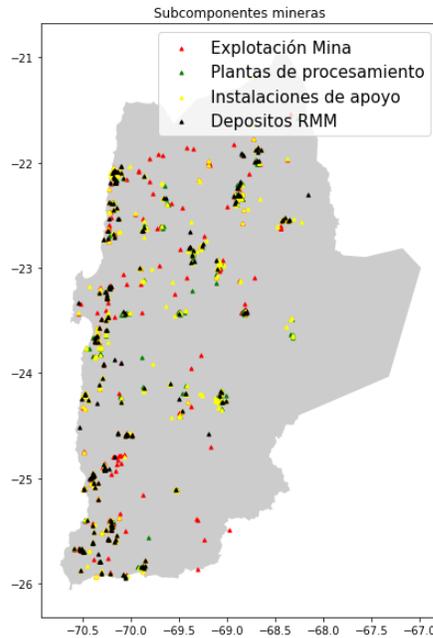


Figura 21: Mapa de subcomponentes mineras en la región de Antofagasta. Fuente: Elaboración propia.

## 6.2. Amenazas: determinación e índices

### 6.2.1. Amenazas climáticas y riesgos en la minería

Para determinar las amenazas que son consideradas en el estudio del riesgo, se realiza un cruce entre los eventos climáticos extremos que ya han afectado a la región de Antofagasta y los que afectan a la minería. En ambos casos se lleva a cabo una revisión bibliográfica de los acontecimientos.

#### 6.2.1.1. Eventos climáticos que afectan a la minería

El sector minero puede ser afectado por diversos eventos climáticos. Utilizando como referencia el estudio desarrollado por ACON, en el cual se investigan riesgos climáticos para la minería colombiana, se determina que las principales amenazas para el sector son Olas de calor, Heladas, Vendavales, Inundaciones, Remoción en masa, Elevación en el nivel medio del mar y sequías (ACON, 2015). Por lo tanto, se tomarán como referencia estos eventos climáticos como posibles factores amenazantes para el sector minero de Antofagasta. A continuación, se presentan la definiciones de cada uno de ellos (ver Tabla 7).

Amenaza	Definición
Olas de calor	“Un periodo extendido de tiempo de inusual estrés relacionado al calor en la atmosfera, que causa modificaciones en el estilo de vida y a la vez puede provocar consecuencias adversas en la salud de la población” (Robinson, P., 2001). Una Ola de calor ocurre cuando la temperatura máxima promedio es excedida en 5°C por más de 5 días consecutivos (Frich, P. et al, 2002).
Precipitaciones extremas (Inundaciones)	Son consecuencias de fuertes lluvias y crecidas de torrenciales, las cuales se producen por el desbordamiento de un cauce, debido a que su capacidad hidráulica se ha visto excedida por el volumen de agua generado por la lluvia (ACON, 2015).
Sequías o déficit de lluvias	Se define como un período de condiciones anormalmente secas durante suficiente tiempo para causar un desequilibrio hidrológico grave. El término sequía es relativo. Todo periodo con déficit anormal de precipitación se define como sequía meteorológica. Las megasequías son sequías prolongadas y extensas, que duran mucho más de lo normal, generalmente un decenio o más (Centro Cambio Global UC, 2019).
Heladas	Son un fenómeno climático que consiste en un descenso de la temperatura ambiente a niveles inferiores al punto de congelación del agua y hace que el agua o el vapor que está en el aire se congele y se deposite en forma de hielo en las superficies. Este fenómeno es muy común en las zonas de altitudes cercanas a los 2.500 m.s.n.m. o más en los meses de poca nubosidad, como diciembre y enero (ACON, 2015).
Vendavales	Cuando se presentan modificaciones en la temperatura y presión de los sistemas meteorológicos, es posible la presencia de vendavales, que se definen como ráfagas de viento que afectan un área en particular con velocidades que oscilan entre 50 y 80 kph en un intervalo corto de tiempo (ACON, 2015).
Remoción en Masa	Se define como una “remoción en masa” a todos aquellos movimientos de una masa de roca, de detritos y suelos por efecto de la gravedad (Cruden, 1991). Las remociones en masa deben su origen a la suma y combinación de diferentes factores condicionantes ya sea de tipo geológico, morfológico, climáticos y antrópicos (Cruden y Varnes, 1996). Al menos uno de esos factores actúa como gatillantes o detonantes de los procesos de remoción, siendo los más comunes, las precipitaciones intensas y los sismos (Wieczorek, 1996). (Sernageomin, 2010).
Elevación en el nivel medio del mar	La elevación en el nivel medio del mar es un fenómeno que ocurre debido al calentamiento de la atmósfera, y afecta al océano por dos motivos principales, el primero corresponde al derretimiento del agua que se encuentra en estado sólido (principalmente en el ártico) y la segunda a un incremento en el nivel debido a la expansión térmica del mar (ACON, 2015).

Tabla 7: Definición de las amenazas. Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con las definiciones anteriores, los eventos amenazantes pueden clasificarse como se muestra en la siguiente tabla:

Evento	Subevento
Incremento de precipitaciones	Inundaciones
	Remoción en Masa
Disminución de precipitaciones	Sequía
Aumento de temperatura	Sequía
	Elevación del nivel del mar
Variabilidad Climática	Inundaciones
	Olas de calor
	Heladas
	Vendavales

Tabla 8: Resumen de eventos amenazantes relevantes para el análisis de vulnerabilidad del sector minero al cambio y variabilidad climática. Fuente: ACON – Miembro Grupo INERCO, 2015

#### 6.2.1.2. Eventos climáticos observados en Antofagasta

En consecuencia con la sección 2.1.3 del presente informe, la región de Antofagasta ha sido afectada principalmente por los siguiente fenómenos:

- Lluvias torrenciales
- Sequía
- Olas de calor
- Vendavales

Por lo tanto, dado que son eventos que han acontecido en la región, se procede a realizar un cruce con las posibles amenazas expuestas en la Tabla 8, para de esta manera definir los posibles factores amenazantes del sector minero de Antofagasta.

Es evidente que los cuatro eventos climáticos que han afectado a la región también constituyen un problema para el sector minero, por lo tanto, se recopilan antecedentes de los estragos que han causado o podrían causar a la minería, tanto nacional como internacional. En base a esto último se decretan los factores definitivos que son considerados en el presente estudio.

#### 6.2.1.3. Recopilación bibliográfica de impactos climáticos en minería

##### **Olas de calor**

Se suelen omitir los costos en salud humana proveniente de eventos climáticos extremos. Las olas de calor reducen la habitabilidad de las comunidades mineras y provoca que haya riesgos para la salud y la seguridad (Loechel et. al, 2013). De manera más específica, el trabajo en minas subterráneas es severamente afectado si existe un fuerte estrés de calor, ya que puede provocar infartos al corazón o hipertermia, llevando incluso a la muerte si el cuerpo de la persona supera los 40°C. De manera menos grave, estas condiciones extremas conllevan a un trabajo más ineficiente y menos productivo, afectando principalmente la destreza y coordinación; la habilidad de mantenerse alerta durante tareas largas y monótonas; la visión; y la habilidad de tomar decisiones rápidas, entre otras cosas (Maurya, T. et al., 2015).

## **Inundaciones y remociones en masa**

Las inundaciones traen grandes problemas en la industria minera si no existen planes de adaptación. El sector minero australiano sufrió los efectos de este fenómeno en los periodos invernales de 2007-2008 y 2010 – 2011 mostrando el grado de vulnerabilidad de la industria y brindaron el aliciente para iniciar un lento cambio en la mentalidad del sector extractivo frente a los impactos a largo plazo (Loechel et al., 2013). Las inundaciones pueden llegar a desestabilizar las paredes de los pozos, provocando el colapso de una mina subterránea, ocasionando pérdidas de vidas y de maquinaria pesada, (PartnerRe, 2011). Por lo tanto, estos eventos extremos pueden traer serias consecuencias tanto económicas como para la integridad del personal presente en los yacimientos.

Las inundaciones ya han hecho estragos en la minería a nivel global, trayendo consecuencias en la producción. En el 2010, la producción minera colombiana se redujo ya que la extracción operó de manera más lenta por el estado del tiempo debido a las inesperadas inundaciones ocurridas en los yacimientos (ACON, 2015). Hablando de números, en el año 2011 en Queensland (Australia) se produjeron fuertes inundaciones que afectaron principalmente a tres mineras de carbón. Para la mina Esham, se estima que hubo pérdidas de \$100 millones de dólares en equipos que quedaron sumergidos por las inundaciones, mientras que el costo total en pérdidas para dicha faena fue estimado por sobre los \$300 millones de dólares. En la misma zona, el yacimiento Baralaba tuvo pérdidas operacionales que llegaron a los \$22 mil millones de dólares y la faena Yallourn alcanzó los \$109 millones de dólares en costos. En total, las pérdidas relacionadas con las inundaciones en Queensland fueron evaluadas en \$30,000 millones de dólares (Mason, L et al., 2013). Chile no ha sido la excepción. En el 2015, las operaciones de extracción y tratamiento de las minas Candelaria y Ojos del Salado, en la Región de Atacama fueron suspendidas temporalmente debido al frente de mal tiempo en el norte del país. Las fuertes precipitaciones provocaron inundaciones y cortes de energía en ambos yacimientos, lo que también dificultó el acceso al lugar (Portal minero, 2015). Las minas ubicadas en la región de Antofagasta también han sufrido por las inesperadas lluvias. En 2019, Codelco se vio obligada a suspender las operaciones de sus divisiones Ministro Hales y Chuquicamata (la mina de cobre más grande del mundo), debido a las intensas precipitaciones que se generaron en el norte de Chile. A modo ilustrativo, en base a los datos entregados por la memoria de Codelco del 2020, Chuquicamata produce \$3,200 millones de dólares a anuales (correspondiente al 23% del total de Codelco). Por lo tanto, el cese de la producción durante un día puede valer aproximadamente \$9 millones de dólares. Si bien la decisión del cierre fue de forma preventiva, los trabajadores señalaron que efectivamente hubo inundaciones en ciertas áreas de la mina, como también el desplome de una techadura en las oficinas de avanzada (Energiminas, 2019).

Las inundaciones también traen consigo importantes riesgos para la salud e integridad de los trabajadores. En un estudio realizado por la Agencia Nacional Minera de Colombia, entre el 2005 y 2014 el 44.6% de los accidentes correspondió a eventos relacionados con fuertes precipitaciones (Agencia Nacional Minera de Colombia, 2015). En un caso más cercano, el 9 de junio de 2017, dos trabajadores quedaron atrapados a gran profundidad, debido a inundaciones en la mina de oro Delia II, en la región de Aysén (El Mostrador, 2017). Lamentablemente, luego de semanas de búsqueda, el 27 de junio del mismo año se confirmó la muerte de ambas personas (Cooperativa, 2017).

De la mano con las inundaciones, se pueden dar situaciones de remociones en masa (o deslizamientos de tierra), ya que pueden estar directamente relacionados con eventos de precipitaciones extrema (ARClím, 2020). En el año 2013, un importante deslizamiento de tierra ocurrió en la mina de Bingham Canyon, ubicada en Utah, Estados Unidos. De acuerdo con estimaciones, el derrumbe abarcó una superficie de 600 mts. de ancho. Dado que en la compañía estaban al tanto de esta amenaza no hubo muertos ni lesionados (Minería Chilena, 2013). En el 2020, se produjo un fallecimiento de un minero por deslizamiento de tierra en la ex Minera Dayton, denominado La California del sector El Toro, en la comuna de Andacollo, región de Coquimbo (Reporte minero, 2020). En enero de 2021, se produjo un deslizamiento de mineral en la mina El Teniente ubicada en Rancagua. La División informó que las intensas lluvias, inusuales para la época, provocaron deslizamientos de tierra puntuales que no produjeron daños mayores (El Rancagüino, 2021).

### **Sequías o déficit de lluvias y la minería**

El caso extremo opuesto a las inundaciones son las sequías. Este fenómeno genera un especial impacto en la minería ya que esta industria depende estrechamente del recurso hídrico. Sin ir más lejos, en la minería chilena ya se han observado los estragos del cambio climático. Desde el 2019 Chile vive unas de las peores sequías por falta de lluvias y específicamente el sector minero se ha visto severamente afectado por la escasez de recursos hídricos. De hecho, la faena Los Bronces ubicada en la Región Metropolitana ha sido una de las más golpeadas. La producción de dicha planta disminuyó en 28% a 71.700 toneladas en el periodo octubre-diciembre del 2019, y se registró una disminución del 44% en el procesamiento de la planta (7 millones de toneladas vs. 13 millones de toneladas), debido a la menor disponibilidad de agua. Durante el primer trimestre del 2020, la faena nuevamente sufre un desplome en su producción cayendo en un 25%, a 68.700 toneladas, mientras que el procesamiento de esta retrocedió un 42%.

De la revisión, se concluye que Olas de calor, lluvias extremas y sequías son amenazas claras y de alto riesgo para el sector implicando grandes pérdidas económicas y poniendo en riesgo la salud e integridad del personal de las faenas. Por otro lado, si bien los vendavales pueden causar problemas por levantamiento de polvo, no se halló literatura ni antecedentes que puedan indicar que dicho evento presente un riesgo significativo para las mineras de Antofagasta, por lo que se descarta su análisis.

Dado esta revisión, las tres amenazas a considerar en el estudio son:

- Precipitaciones extremas
- Sequía
- Olas de calor

### 6.2.2. Índices de amenazas

De acuerdo con las amenazas determinadas en el paso anterior, se resumen los índices climáticos que se utilizan para los tres mapas de amenazas, en base a los datos extraídos desde el repositorio de ARClim:

Amenaza	Índice Climático que se utiliza	Descripción
Precipitaciones extremas	Precipitaciones máximas anuales (en mm)	Valor máximo de la precipitación (lluvia y nieve) diaria.
Sequía	Días secos consecutivos	Número máximo de días consecutivos en que la precipitación diaria no supera 1 mm.
Olas de calor	Días calurosos (>30°C)	Número de días en que la temperatura máxima supera los (>30°C).

Tabla 9: Amenazas e índices climáticos a considerar. Fuente: Elaboración propia.

#### 6.2.2.1. Precipitaciones extremas

A través del mapa de precipitaciones extremas del territorio nacional, se obtiene el mapa de amenazas asociado a dicho fenómeno acotado a la región de Antofagasta. Este recorte fue realizado a través de un archivo tipo *shape* que contiene el polígono que define al territorio de interés.

El índice climático de precipitaciones extremas está en milímetros de agua y nieve caídos, correspondiendo a la máxima precipitación diaria registrada en un año. Dado que las simulaciones que construyen estos índices abarcan un marco de tiempo de 30 años, el valor que se observa es el promedio de los máximos diarios observados en cada año. A continuación, se exponen los mapas para la situación presente (1980-2010), futuro (2035-2065) y la diferencia entre ellos (en milímetros de agua caída).

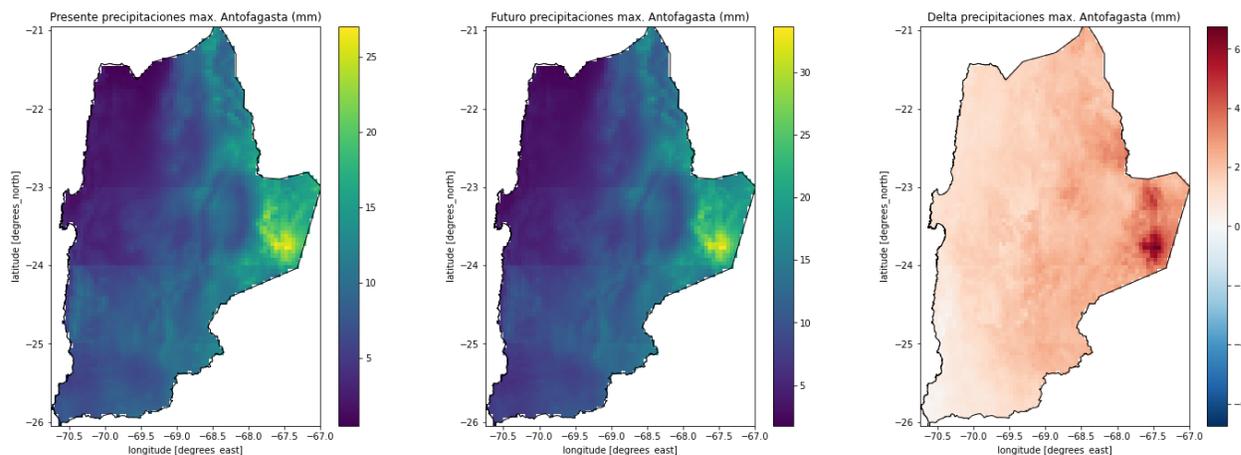


Figura 22: Mapas de amenaza de precipitaciones para la región de Antofagasta. Fuente: Elaboración propia a través de mapas ARClim

Como se puede observar, al costado de cada mapa se encuentra una barra de colores que indica el valor del índice climático. Para la situación presente y futura se puede apreciar que en zonas costeras se proyectan precipitaciones que no superarán los 15 mm diarios. Por otro lado, para zonas cordilleranas, se puede notar una notable diferencia en la cantidad de lluvias y nieve caída, pudiendo superar incluso los 30 mm de agua caída.

El mapa que reúne las diferencias entre la situación presente y futuro corresponde a los índices de amenazas que son utilizados dentro del proyecto. Esto último representa el cambio que habría en un escenario pesimista, lo cual vendría a ser la situación a la que se podría enfrentar el sector minero. Siguiendo los colores del mapa, se puede apreciar que en todo el territorio se proyecta un escenario en que habrá un aumento promedio de casi 2 mm en todo el territorio en las precipitaciones máximas diarias, llegando incluso a 6 mm más de los normal, en un territorio en que anualmente caen en total 11 mm en sectores costeros y hasta 82 mm en los sectores cordilleranos (Ciren, 2016).

#### 6.2.2.2. Sequía

Análogo al mapa anterior, ahora se construyen los mapas de amenazas relacionados con la sequía para la región de estudio. Este índice muestra la cantidad de días consecutivos en los que las precipitaciones no superaron 1mm de agua caída.

Si bien se puede observar que en la mayoría de la región se puede llegar a más de 500 días sin lluvias, en ciertos sectores esta cifra es aún mayor superando incluso 2000 días sin agua caída (casi 7 años). Esto último se condice con la aridez que caracteriza a la región.

El escenario pesimista de la situación futura propone que en gran parte de la región se mantendrá constante la aridez (ver mapa Delta días consecutivos sequía Antofagasta, figura 23), salvo una zona al norte donde habría una disminución de los días consecutivos de sequía, superando incluso 500 días menos sin agua caída.

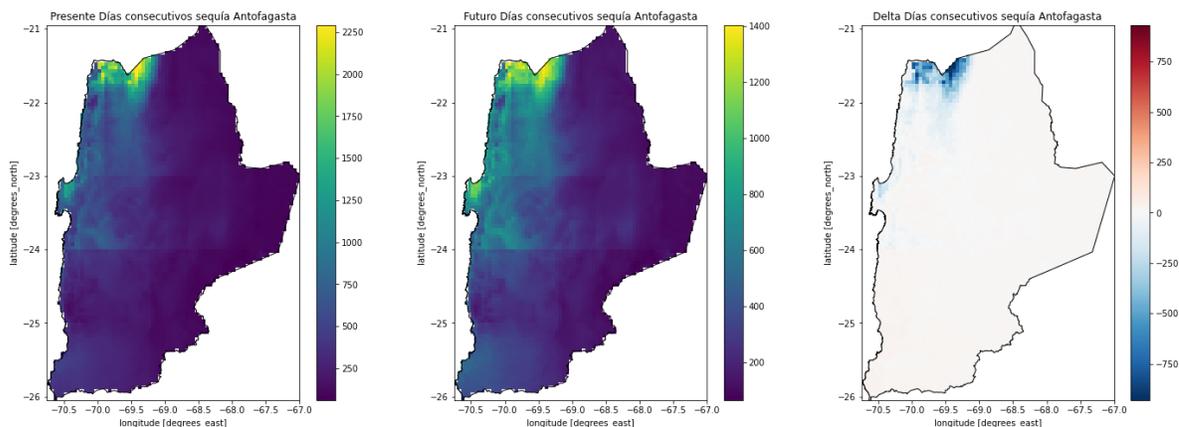


Figura 23: Mapas de amenaza días consecutivos sin precipitaciones (sequía) para la región de Antofagasta. Fuente: Elaboración propia a través de mapas ARCLim.

#### 6.2.2.3. Olas de calor

De acuerdo con la definición brindada por la Dirección Meteorológica de Chile, una ola de calor considera las siguientes características: la temperatura máxima diaria debe ser superior al umbral del percentil 90 climatológico diario, y esta situación debe presentarse al menos por 3 días consecutivos (Meteored, 2020). En Antofagasta, los veranos son calientes y áridos; los inviernos son largos, frescos y secos y está mayormente despejado durante todo el año. Durante el transcurso del año, la temperatura generalmente varía de 13 °C a 25 °C y rara vez baja a menos de 10 °C o sube a más de 27 °C (Weather Spark), Considerando esto último, temperaturas sobre los 30°C serían parte del percentil 90, por lo tanto, 3 o más días consecutivos bajo esta situación entraría a la definición de ola de calor.

Los mapas de olas de calor para la segunda región contienen el índice climático que indica la cantidad de días consecutivos sobre 30°C en cada píxel del sector. A continuación, se presentan los mapas de la amenaza respectiva (ver Figura 24).

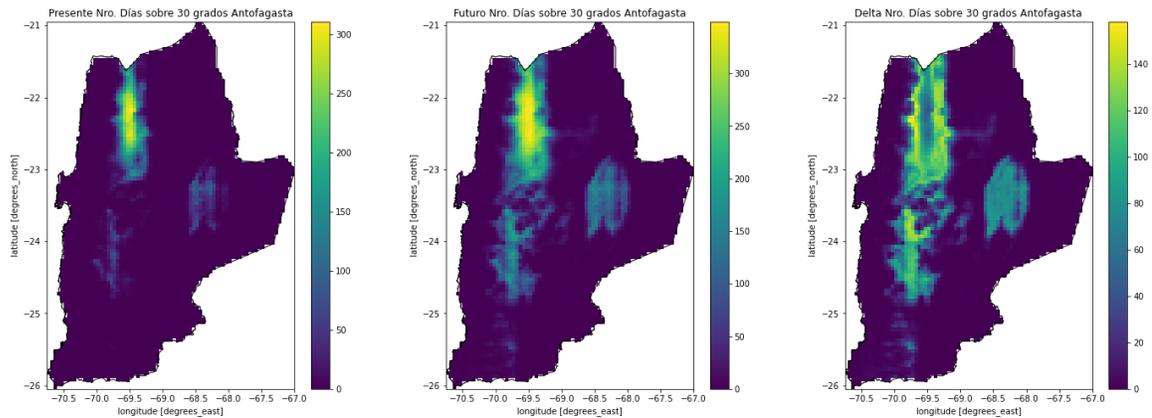


Figura 24: Mapas de amenaza días consecutivos sobre los 30°C (olas de calor) para la región de Antofagasta. Fuente: Elaboración propia a través de mapas ARClm.

En resumen, los índices de amenazas que son utilizados para la estimación del riesgo corresponden a las diferencias entre la situación actual con la situación futura, ya que esto entrega una medida de qué tan alejado se estará de la situación presente (ver Tabla 10).

Amenaza	Índice climático	Índice para la estimación del riesgo
Precipitaciones extremas	Precipitaciones máximas anuales (en mm)	$x_{pp}$ : Precipitaciones máximas presentes. $x_{pf}$ : Precipitaciones máximas futuras. $A_p$ : Amenaza de precipitaciones extremas. $A_p = x_{pf} - x_{pp}$
Sequía	Días secos consecutivos	$x_{sp}$ : Días secos consecutivos presente $x_{sf}$ : Días secos consecutivos futuro $S_s$ : Amenaza de días secos consecutivos $S_s = x_{sf} - x_{sp}$
Olas de calor	Días calurosos (>30°C)	$x_{op}$ : Días calurosos presente $x_{of}$ : Días calurosos futuro $O_{oc}$ : Amenaza de días calurosos $O_{oc} = x_{of} - x_{op}$

Tabla 10: índices de amenazas para estimar el riesgo climático en minería de Antofagasta. Fuente: Elaboración propia.

### 6.3. Riesgos e impactos

Considerando los subcomponentes mineros de interés y las tres amenazas expuestas anteriormente, se definen los riesgos que son analizados. Para definir el riesgo que es estudiado, se recurre principalmente a una revisión bibliográfica de antecedentes de impactos que las amenazas consideradas puedan provocar en las cuatro subcomponentes.

#### 6.3.1. Riesgo asociado a lluvias extremas

Las lluvias extremas pueden provocar impactos físicos directos tales como inundaciones y remociones en masa. Estos dos impactos son señalados en la literatura como importantes amenazas para tres subcomponentes mineras: Explotación mina, Instalaciones de apoyo y Depósitos RMM.

Las inundaciones pueden llegar a provocar severos impactos en la producción, ya que minas de rajo abierto o subterráneas se vuelven inaccesibles, y/o su equipo inutilizable. A su vez, esto último conlleva a incumplimiento de contratos y pérdidas de negocios donde la producción no se puede recuperar por largos periodos (Mason, L et al., 2013). Además, el personal presente en las faenas se puede ver gravemente afectado debido a estos acontecimientos extremos, poniendo en riesgo su integridad y salud.

Por otro lado, las instalaciones de apoyo se pueden ver afectadas si están construidas en áreas donde el agua se acumula o viaja a altas velocidades (Mason, L et al., 2013), provocando derrumbes o remociones en masa, lo que puede dañar caminos y otros tipos de sistemas lo que perjudica gravemente la producción.

Finalmente, los depósitos de residuos pueden llegar a superar su capacidad máxima de retención de agua, resultando en movilizaciones de aguas contaminantes, lo que conlleva a severos riesgos para el entorno, ecosistema, imagen de la empresa y las comunidades (Mason, L et al., 2013).

De acuerdo con la revisión bibliográfica, no se señalan consecuencias explícitas para las plantas de procesamiento, por lo que un presunto riesgo para este subcomponente no es estudiado. De todos modos, se debe tener en cuenta que sí puede haber riesgos para dicha entidad los cuales pueden ser determinados en una profundización de esta problemática mediante metodologías como talleres que reúnan expertos del sector minero y/o entrevistas en profundidad.

A continuación, se presenta el resumen de los riesgos que son estudiados para la amenaza asociada a lluvias extremas (ver Tabla 11):

Lluvias Extremas				
	Explotación mina	Plantas de procesamiento	Instalaciones de apoyo	Depósitos RMM
Impacto físico directo	Inundaciones (y deslizamientos)	-	Remoción en masa	Inundaciones y deslizamiento
Riesgo	Riesgo de inundación de faenas y daños de infraestructura	-	Riesgo en instalaciones de apoyo por remociones en masa	Riesgo de rebosamiento de depósitos
Consecuencias	Daños en equipos e infraestructura, daños en el personal, cierre de faenas y la consecuente reducción en producción (Mason, L et al., 2013).	-	Daños en áreas de almacenamiento que son construidas en lugares donde el agua se acumula, o viaja a altas velocidades, bajo tormentas o condiciones de inundaciones (Mason, L et al., 2013). Daños en caminos de transporte (Feary, 2008).	Movilización de aguas contaminadas (Mason, L et al., 2013)

Tabla 11: Riesgos por lluvias extremas. Fuente: Elaboración propia.

### 6.3.2. Riesgo asociado a sequía

Para la minería, el agua es un recurso estratégico ya que es esencial para el procesamiento de los minerales (Cochilco, 2020). De acuerdo con el informe Consumo de Agua en la minería del Cobre elaborado por Cochilco el año 2019, en dicho periodo se destinaron  $69,83 \text{ m}^3/\text{seg}$  para la minería, obteniendo 5.787,4 miles de toneladas de cobre fino. Se observa que el agua de origen continental alcanzó los  $12,45 \text{ m}^3/\text{seg}$  (18%), el agua de mar llegó a los  $4,06 \text{ m}^3/\text{seg}$  (6%) y el agua recirculada fue de  $53,32 \text{ m}^3/\text{seg}$  (76%) (Cochilco, 2020).



Figura 25: Distribución del consumo de agua total en la industria minera del cobre año 2019. Fuente: Elaborado por DEyPP, Cochilco 2020

Según Cochilco, se identifican y agrupan 5 distintas áreas de consumo de agua en la industria minera del cobre en base al procesamiento de minerales y otras áreas, las que se describen a continuación:

- Área mina
- Área planta concentradora
- Área planta hidrometalurgia
- Fundición y refinería
- Cesión o venta a terceros
- Otros/Servicios

En el Área Planta Concentradora, se realizan los procesamientos de minerales, el cual representa el mayor consumo de agua con respecto a los volúmenes totales. Esta área involucra la conminución del mineral, luego la flotación, clasificación y espesamiento. Las aguas residuales de los procesos pueden o no ser recirculadas al proceso desde las lagunas de los depósitos de relaves, como de los procesos de espesamiento y filtrado, entre otros (Cochilco, 2020).

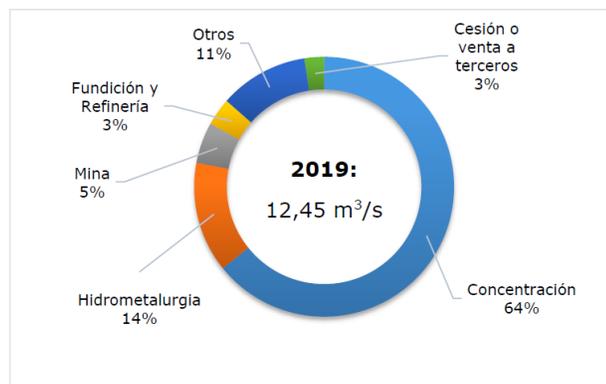


Figura 26: Distribución porcentual de las aguas según proceso minero 2019. Fuente: DEyPP, Cochilco 2020

Como se observa, el proceso de Concentración es el que acapara los mayores flujos de agua, llegando al 64% de los recursos hídricos continentales. En segundo lugar, se encuentra el consumo asociado al proceso de hidrometalurgia para la obtención de cátodos a partir de minerales oxidados, alcanzando un 14%.

De las áreas mencionadas, Fundición y refinería, Área planta concentradora y planta de hidrometalurgia son parte del subcomponente “Plantas de procesamiento”. Considerando lo anterior, esta entidad utiliza en total el 81% de las aguas continentales, muy por encima de, por ejemplo, el área extracción minera que solo requiere del 5%.

Dado el exhaustivo uso del recurso hídrico por parte de las plantas de procesamiento, se analiza el riesgo solo en esta subcomponente.

Como se menciona en la sección 6.2.1.3. del presente informe, la falta de agua en los procesos provoca una disminución en la producción que tiene severas consecuencias económicas para las mineras. Por lo tanto, el riesgo asociado a esta amenaza y subcomponente corresponde a “Riesgo de disminución de producción por falta de suministro hídrico” (ver Tabla 12).

Sequía				
	Explotación mina	Plantas de procesamiento	Instalaciones de apoyo	Depósitos RMM
Impacto físico directo	-	Disminución del recurso hídrico	-	-
Riesgo	-	Riesgo de disminución de producción por falta de suministro hídrico.	-	-
Consecuencias	-	Pérdidas en la capacidad de producción, incumplimiento de contratos (Mason, L et al., 2013). Utiliza el 81% de las aguas continentales.	-	-

Tabla 12: Riesgos por sequía. Fuente: Elaboración propia.

### 6.3.3. Riesgos asociados a olas de calor

Las olas de calor pueden llegar a poner en grave riesgo a los y las trabajadores del sector minero dado las altas temperaturas que podrían enfrentar. De hecho, puede afectar al personal presente en cualquiera de los subcomponentes mineros, incrementando niveles de estrés, enfermedades e incluso las tomas de decisiones dentro de la jornada laboral (Mason, L et al., 2013).

Por esto último, el riesgo de salud hacia los trabajadores está presente de manera transversal en todos los subcomponentes ya que las personas pueden estar en cualquiera de ellos. Por lo tanto, para este caso el riesgo asociado a la salud del personal será estudiado en conjunto con todas las subcomponentes (ver Tabla 13).

Olas de calor				
	Explotación mina	Plantas de procesamiento	Instalaciones de apoyo	Depósitos RMM
Riesgo	Riesgo de salud en trabajadores durante la ejecución de actividades.			
Consecuencias	Problemas de salud, error en tomas de decisiones, lesiones graves, incluso la muerte.			

Tabla 13: Riesgos por Olas de calor. Fuente: Elaboración propia.

En resumen, se trabajan 5 riesgos:

1. Riesgo de inundación de faenas y daños de infraestructura.
2. Riesgo en instalaciones de apoyo por remociones en masa.
3. Riesgo de rebosamiento de depósitos.
4. Riesgo de disminución de producción por falta de suministro hídrico.
5. Riesgo de salud en trabajadores durante la ejecución de actividades.

Cabe recalcar que esto implica la construcción de cinco cadenas de impactos para cada uno de estos riesgos y, por lo tanto, la generación de cinco mapas de riesgo climáticos. Esto último implica una cuantificación de cada uno de los eslabones de la cadena de impacto (exposición, vulnerabilidad, amenazas y finalmente, el riesgo).

#### 6.4. Exposición

De acuerdo con la metodología, se recomienda formular esta componente en una forma que exprese la relevancia de los elementos expuestos del sistema de interés. Por ejemplo, “las hectáreas utilizadas por la pequeña agricultura” o “número de pequeños agricultores” podrían ser factores acordes a un contexto relacionado con el estudio del riesgo en la agricultura para una determinada zona.

Por lo tanto, bajo el contexto de evaluación del riesgo para el sector minero, para cada subcomponente analizada se considerará como exposición los siguientes factores (ver Tabla 14):

Subcomponente	Exposición
Explotación Mina	Número de instalaciones de explotación de mina en una superficie de 25 km <sup>2</sup>
Plantas de procesamiento	Número de instalaciones de plantas de procesamiento en una superficie de 25 km <sup>2</sup>
Instalaciones de apoyo	Número de instalaciones de apoyo en una superficie de 25 km <sup>2</sup>
Depósitos RMM	Número de instalaciones de Depósitos RMM en una superficie de 25 km <sup>2</sup>

Tabla 14: Subcomponentes y exposición respectiva. Fuente: Elaboración propia.

La componente territorial de exposición puede ser estudiada a nivel comunal e incluso regional, pero se opta por una superficie de 25 km<sup>2</sup> para así lograr un análisis más específico de la situación, considerando el comportamiento variable del clima a lo largo de la región de Antofagasta. Además, esta dimensión de superficie facilita la interacción con el tamaño de la grilla contenidos en los mapas de índices climáticos ya que también son de 5 x 5 km.

Para la construcción de los mapas de exposiciones, se deben procesar los puntos geográficos de cada subcomponente que están presentes en la base de datos de instalaciones mineras (catastro de

faenas en Chile). Al igual que los archivos grillados del clima que representan las amenazas en el territorio, se trabaja con mapas grillados que muestran la exposición de cada subcomponente. La siguiente figura ilustra lo mencionado:

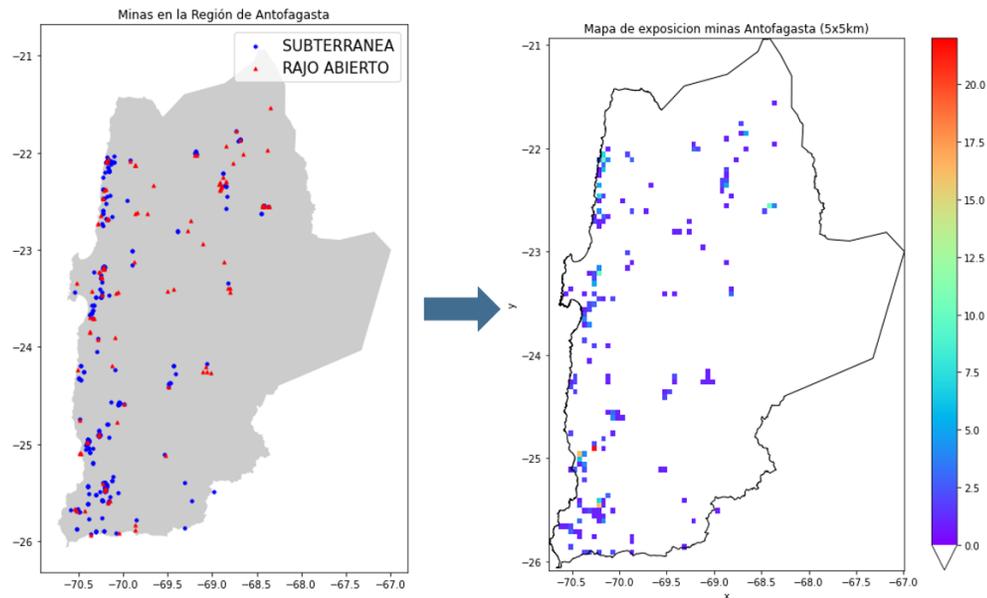


Figura 27: Rasterización de puntos geográficos de minas de rajo abierto y subterráneas de la región de Antofagasta. Figura A (izquierda) son puntos geográficos; figura B (derecha) corresponde a los puntos grillados en píxeles de 5x5 km. Fuente: Elaboración propia

Como se observa, cada punto correspondiente a un tipo de mina es llevado a una grilla de 5x5 km, donde cada píxel indica la cantidad de instalaciones que se encuentran dentro de éste. Una mayor cantidad de puntos dentro de una grilla representa una mayor exposición en dicho píxel.

En la siguiente figura, se presentan los puntos correspondientes a cada subcomponente que son rasterizados<sup>2</sup> para construir el mapa de exposiciones (ver Figura 28).

<sup>2</sup> Se refiere al proceso de llevar puntos vectoriales a un píxel, el cual representará una determinada superficie. En este caso, cada pixel es de una superficie de 25 km<sup>2</sup>.

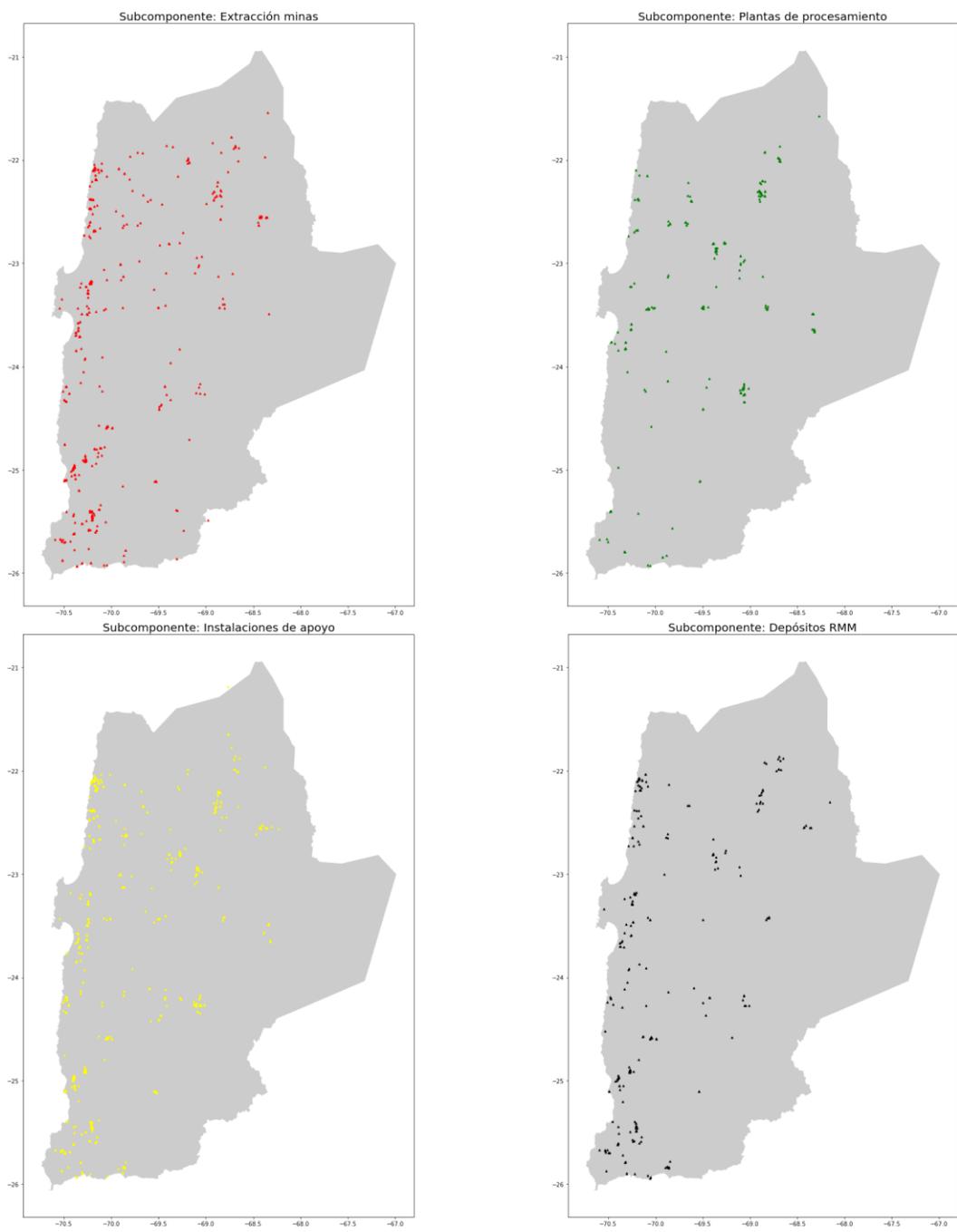


Figura 28: Puntos de subcomponentes de faenas mineras en la región de Antofagasta. Fuente: Elaboración propia.

De esto último, se debe considerar que cada mapa es rasterizado y llevado a una grilla de 5x5 km<sup>2</sup>. Por lo tanto, los mapas en formato ráster se ven de la siguiente forma (ver Figura 29):

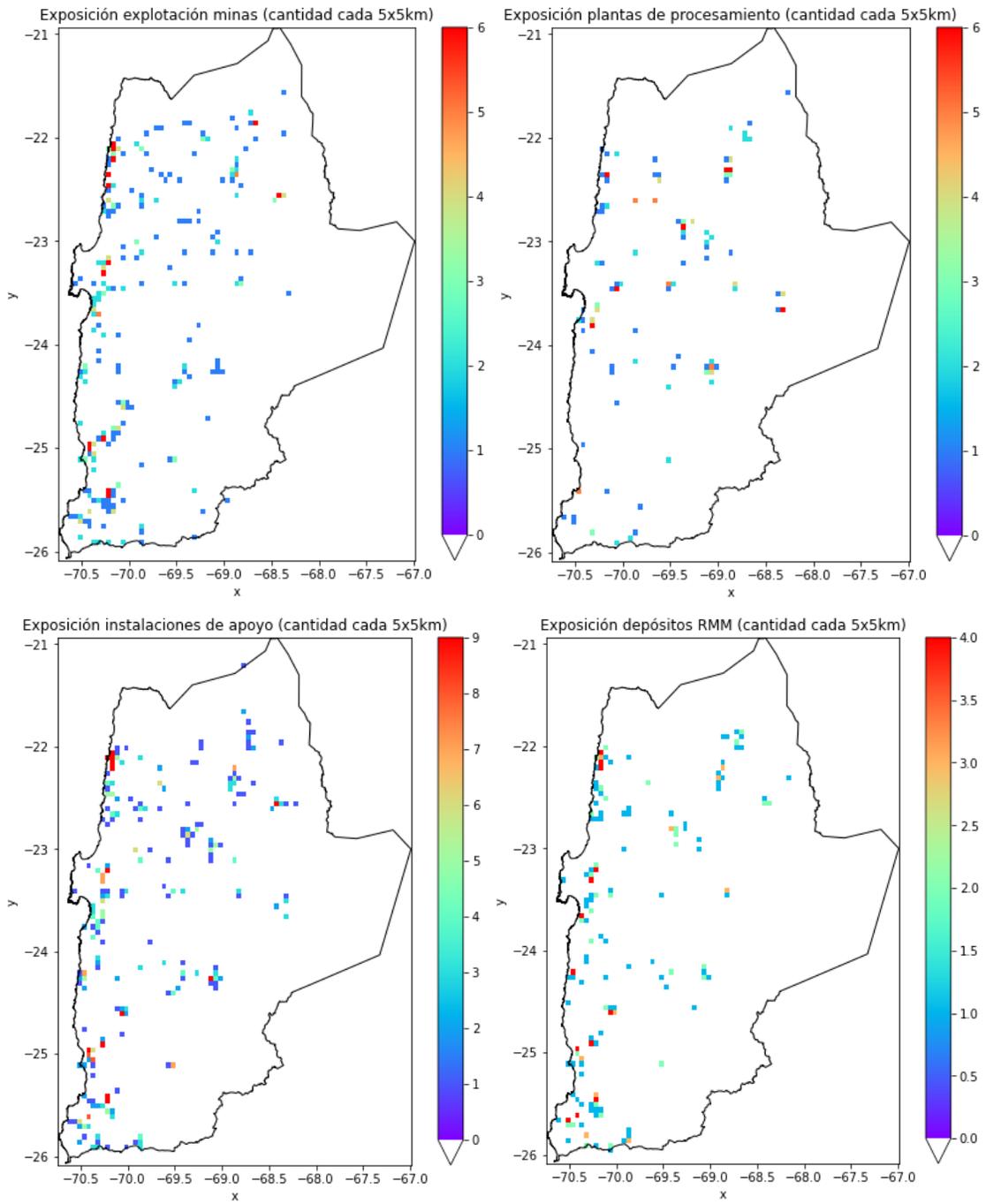


Figura 29: Mapa de subcomponentes rasterizados en una grilla de 5x5 km<sup>2</sup>. Fuente: elaboración propia

## 6.5. Vulnerabilidades

Un último paso relevante es la determinación de la vulnerabilidad. Como se menciona en la sección 2.3, este factor se suele componer de dos conceptos: sensibilidad y capacidad.

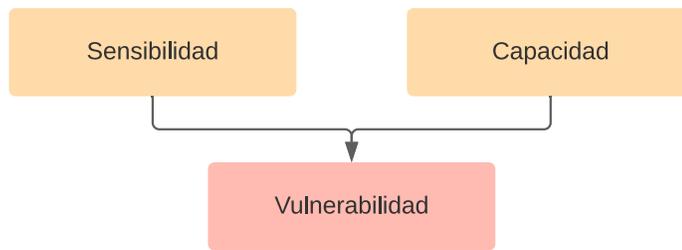


Figura 30: Componentes de la vulnerabilidad. Fuente: Elaboración propia.

Esta etapa viene a responder la pregunta: ¿Cuáles atributos del sistema contribuyen al riesgo? En este caso, el “sistema” corresponde a cada subcomponente de las faenas mineras que se estudian: Explotación mina, plantas de procesamiento, instalaciones de apoyo y depósitos RMM.

Los factores identificados para la componente de vulnerabilidad representan los aspectos de sensibilidad y capacidad, donde el último cubre tanto la capacidad de enfrentar como de adaptarse.

Para determinar los factores, se participa en un taller con expertos en materia climática y minería. Una vez recopilada la información, se procede a seleccionar los atributos del sistema que contribuyen al riesgo, limitados especialmente a los datos a los cuales se tiene acceso y a la factibilidad de modelarlo.

### 6.5.1. Taller de expertos

La participación fue en el taller N°2 de “Riesgo climático y adaptación en el sector minero: hacia un modelo prospectivo”, el cual fue organizado por el proyecto FONDEF de riesgo climático en minería. El evento fue realizado el 27 de octubre de 2021, reuniendo a más de 25 expertos representantes de las siguientes instituciones:

- Ministerio del Medio Ambiente
- DMC
- CODELCO
- Colegio de Geólogos de Chile
- Fondo del agua Santiago-Maipo
- SHOA
- CR2
- SONAMI
- TECK resources
- Consejo Minero
- Corporación alta ley, entre otros

El objetivo principal del taller fue discutir los diversos factores de sensibilidad y resiliencia dentro del contexto minero, desde la perspectiva de los asistentes. La dinámica consistió en primer lugar

dar a conocer las definiciones claves que engloban la problemática, para luego dar paso a conversaciones en grupos. Una vez establecidos los grupos, se realizan preguntas para guiar la discusión.

De acuerdo con la información recopilada, se establecen los siguientes factores de vulnerabilidad (ver tablas siguientes):

Lluvias extremas				
	Explotación mina	Plantas de procesamiento	Instalaciones de apoyo	Depósitos RMM
Riesgo	Riesgo de inundación de faenas, daños de infraestructura e integridad del personal.	-	Riesgo en instalaciones de apoyo por remociones en masa	Riesgo de rebosamiento de depósitos
Factor de vulnerabilidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pendiente del terreno</li> <li>• Tamaño de la faena</li> <li>• Coordinación entre empresas</li> </ul>	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pendiente del terreno</li> <li>• Tamaño de la faena a la que pertenece</li> <li>• Coordinación entre empresas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pendiente del terreno</li> <li>• Tamaño faena a la que pertenece</li> <li>• Coordinación entre empresas</li> </ul>

Tabla 15: Vulnerabilidades asociadas a lluvias extremas. Fuente: elaboración propia.

Como se observa en la tabla, para el caso de las lluvias extremas la pendiente del terreno es una sensibilidad transversal para 3 subcomponentes ya que aumenta la probabilidad de deslizamientos y acumulaciones de agua, contribuyendo así a una mayor vulnerabilidad de las subcomponentes.

Otra factor común es el tamaño de la faena. Esto último viene a indicar la componente de capacidad adaptativa que tiene la instalación para enfrentar esta amenaza, ya que una faena de mayor tamaño implica la existencia de mayores recursos y por lo tanto una capacidad de inversión que puede lograr mejores medidas adaptativas frente a lluvias extremas. En caso contrario, una faena pequeña no tendría recursos suficientes a la hora de sufrir de este tipo de eventos, disminuyendo su capacidad adaptativa y, por ende, aumentando su vulnerabilidad.

Se observa un tercer factor: Coordinación entre empresas. Considerando que el presente trabajo tiene una perspectiva a nivel sectorial, es relevante comprender el grado de dificultad que existe a la hora de querer establecer algún plan de adaptación. En cuyos casos se deben aplicar medidas que requieren un compromiso y coordinación de las faenas y, por lo tanto, una mayor heterogeneidad de dueños en una misma zona conlleva a que las negociaciones y acuerdos fluyan con lentitud, provocando una tardanza en la aplicación de medidas, haciendo más susceptibles al riesgo las instalaciones involucradas. Esto último se cuantifica en base a la “cantidad de dueños diferentes” que existen dentro del área de análisis, donde un mayor número implica más heterogeneidad, aumentando el riesgo de la zona.

Sequía				
	Explotación mina	Plantas de procesamiento	Instalaciones de apoyo	Depósitos RMM
Riesgo	-	Riesgo de disminución de producción por falta de suministro hídrico.	-	-
Factor de vulnerabilidad	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fuentes alternativas de recursos hídricos</li> <li>Tamaño faena</li> <li>Coordinación entre empresas</li> </ul>	-	-

Tabla 16: Vulnerabilidades asociadas a la sequía. Fuente: elaboración propia.

El riesgo de sequía para la subcomponente plantas de procesamiento también se considera el tamaño de la faena como factor de capacidad adaptativa de las instalaciones por el mismo motivo mencionado anteriormente. En este caso toma un rol relevante para la sensibilidad la fuente alternativa de recursos hídricos que posea. Por ejemplo, una faena que cuenta con acceso a aguas desalinizadas será menos sensible a una sequía de recurso hídrico continental. En cambio, minas que dependen en su totalidad de aguas continentales serán altamente sensibles a una escasez, lo que conlleva a una vulnerabilidad mayor. Análogo al caso anterior, también se considera el factor “coordinación entre empresas”, aplicando el mismo motivo señalado.

Olas de calor				
	Explotación mina	Plantas de procesamiento	Instalaciones de apoyo	Depósitos RMM
Riesgo	Riesgo de salud en trabajadores durante la ejecución de actividades.			
Factor de vulnerabilidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tamaño faena</li> <li>Acceso a servicios de salud de urgencia</li> <li>Coordinación entre empresas</li> </ul>			

Tabla 17: Vulnerabilidades asociadas a Olas de Calor. Fuente: elaboración propia.

Finalmente, para el riesgo asociado a olas de calor, se determinan 3 factores de vulnerabilidad: El tamaño de la faena y el acceso a servicios de salud de urgencia (ver Tabla 17).

El tamaño de la faena si bien implica mayor cantidad de trabajadores, también puede significar que dichas personas al pertenecer a una minera de mayor tamaño pueden contar con mejores equipos de seguridad, disminuyendo la sensibilidad a olas de calor. Por otra parte, en la pequeña minería no poseen suficientes recursos para dar una seguridad rigurosa a los trabajadores, aumentando la sensibilidad de éstos con este evento extremo.

Dado que las olas de calor pueden llegar a provocar serios daños a la salud, una mayor distancia a servicios de urgencia conlleva a un aumento en las probabilidades de no alcanzar a lidiar con una situación compleja de salud.

Al igual que los otros riesgos, se considera de manera análoga el factor que contribuye al riesgo “coordinación entre empresas”.

Como se ha mencionado, las interacciones de los factores que componen el riesgo (Amenaza, Exposición y Vulnerabilidad), son resumidas en las cadenas de impacto, las cuales pueden ser vistas en la sección Anexos

Anexo A: Cadenas de impacto.

### 6.5.2. Índices de vulnerabilidad

En base a los componentes de vulnerabilidad definidos en la sección anterior, se da paso a establecer los índices que lo representan:

Factor	Índice
Pendiente del terreno	Pendiente en grados a la cual está sometida la instalación en una grilla de 25 km <sup>2</sup> .
Tamaño de la faena	Según la categoría de la faena (A, B, C ó D), se define índice entre 0 y 1.
Acceso a aguas de mar	Distancia mínima en km de la instalación a una planta desalinizadora.
Acceso a servicio de urgencia	Distancia mínima a servicio de urgencia en KM
Coordinación entre empresas	Cantidad de dueños diferentes de las instalaciones en una superficie de 25 km <sup>2</sup>

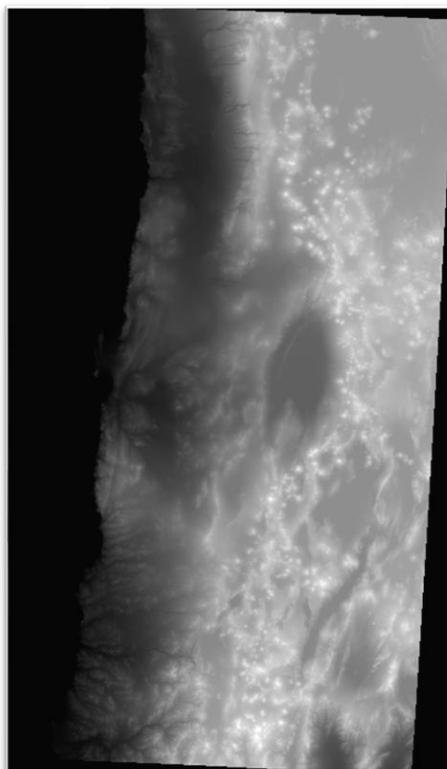
Tabla 18: Factores e índices de vulnerabilidad. Fuente: Elaboración propia.

Para el cálculo total de vulnerabilidad, primero se cuantifican los índices expuestos en la Tabla 18, generando mapas para cada uno de ellos. A continuación, se presentan los criterios y pasos para cada cuantificación.

#### 6.5.2.1. Pendiente del terreno

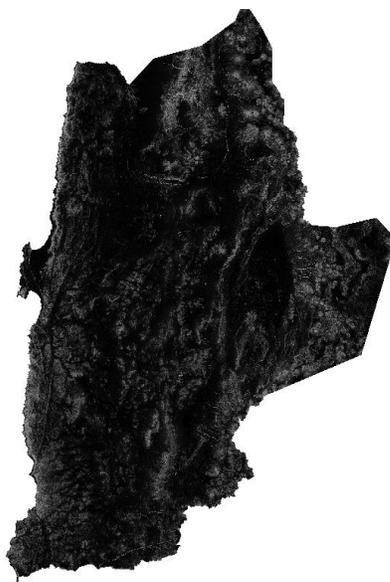
La pendiente del terreno tiene como fin representar la condición del suelo a la que las instalaciones se ven enfrentadas en caso de inundaciones y derrumbes. Una superficie plana posee una menor posibilidad de provocar los estragos mencionados en comparación con un terreno de gran pendiente.

Para modelar la situación, se utiliza un modelo de elevación digital (DEM, por sus siglas en inglés), el cual proporciona las elevaciones (en metros) de un cierto territorio. Tal como se especifica en la 5.2, los datos DEM (ver Figura 31) se obtienen del repositorio de Google Earth Engine, los cuales fueron generados por los satélites Alospalsar de la agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA).



*Figura 31: Imagen DEM que contiene a la región de Antofagasta. Fuente: Google Earth Engine.*

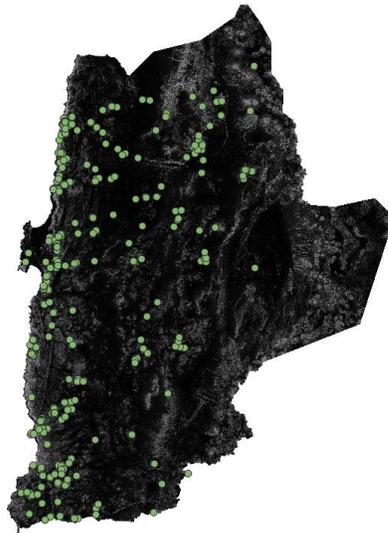
De la figura, se puede observar que las zonas de color blanco representan una mayor altitud, mientras que las oscuras una menor. Para poder representar las elevaciones en pendientes (en grados de inclinación), se procesa la imagen a través del software QGIS. Además, se recorta el territorio utilizando el polígonos que define a la región de Antofagasta (ver Figura 32).



*Figura 32: Mapa de pendientes (en grados) de la región Antofagasta. Fuente: Elaboración propia.*

Finalmente, para cada instalación de interés se extrae la pendiente a la cual está sometida y se almacena junto con la coordenada. Esto último se hizo para las subcomponentes: Minas de extracción, instalaciones de apoyo y depósitos RMM.

A modo de ilustración, en la figura se observan los puntos que representan a las minas de extracción, los cuales fueron utilizados para obtener la pendiente que los rodea, y así almacenar dicha información en los puntos.



*Figura 33: Puntos de minas de extracción y pendiente a la que están sometidas. Fuente: Elaboración propia.*

A través de este proceso se consiguen los índices del factor “pendiente del terreno”, el cual se define como la pendiente del terreno en grados a la cual están sometidas las instalaciones.

#### *6.5.2.2. Tamaño de la faena*

Utilizando el criterio de clasificación de Sernageomin, a cada instalación se le asigna un índice entre 0 y 1 el cual indica el grado de vulnerabilidad de acuerdo con la capacidad adaptativa que tenga la faena. En este punto se realiza el supuesto de que una faena perteneciente a la gran minería (categoría A), posee una mayor disponibilidad de recursos para adaptarse y mejores instrumentos, por lo tanto, se caracteriza por tener una vulnerabilidad menor. Caso contrario para las instalaciones pertenecientes a la mediana y pequeña minería (categoría B y C, respectivamente), las que cuentan con menores recursos y por ende tienen una baja capacidad de adaptación, lo que conlleva a una mayor vulnerabilidad. En la tabla se resume los criterios establecidos por Sernageomin y el índice asignado.

Categoría	Horas de trabajo	Cantidad de trabajadores	Implicancia (supuesto)	Índice asignado
A	$\geq 1,000,000$ horas anuales	+ 400 trabajadores	Faena de gran minería, grandes recursos, altísima capacidad adaptativa y, por ende, menos vulnerable.	0,2
B	Entre 200,000 y 1,000,000 horas anuales	Entre 80 y 400 trabajadores	Faena de mediana minería, suficientes recursos correcta capacidad adaptativa y, por ende, menos vulnerable que C y D.	0,4
C	Entre 30,000 y 200,000 horas anuales	Menos de 80 trabajadores	Faena de pequeña minería, menores recursos y por ende baja capacidad adaptativa. Más vulnerable	0,8
D	Menos de 30,000 horas anuales	Menos de 80 trabajadores	Faena de pequeña minería (incluye artesanal), recursos mínimos, casi nula capacidad adaptativa. Muy vulnerable.	1

Tabla 19: Índices de vulnerabilidad de acuerdo con la categoría de la faena. Fuente: Elaboración propia.

### 6.5.2.3. Acceso a aguas de mar y a servicios de urgencia

Tanto el acceso a aguas de mar y servicios de urgencia, tienen como índice la distancia en kilómetros de la instalación minera respecto al punto más cercano (a una planta desaladora o servicios de urgencia, según sea el caso), por lo tanto, la forma en que se determinan estos factores es análoga, salvo una consideración específica para cada caso.

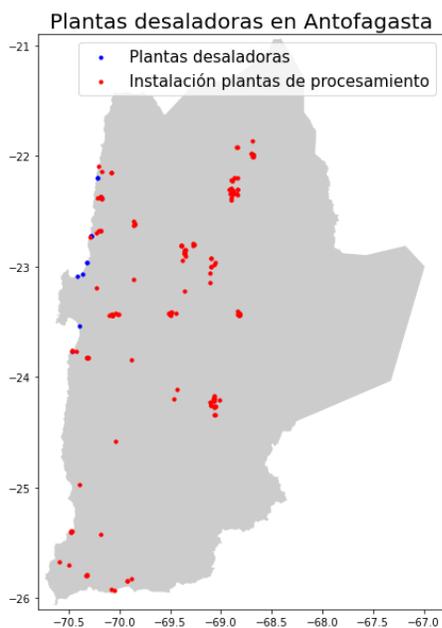


Figura 34: Plantas desaladoras y plantas de procesamiento en Antofagasta. Fuente: Elaboración propia.

Las distancias mínimas (en km) a una planta desaladora (y servicios de urgencia) se almacenan en la base de datos que contiene las coordenadas de las instalaciones. Una distancia mayor implica una mayor vulnerabilidad para ambos casos. Luego, la información se agrupa en una grilla de 5x5km, la cual contiene el promedio de las distancias.

Para las plantas desaladoras, se consideró un factor que disminuye la vulnerabilidad que representa esta componente. Esto último quiere decir que las instalaciones que ya utilizan agua de mar en sus procesos disminuyen su vulnerabilidad proporcionalmente al porcentaje del recurso hídrico que proviene de plantas desalinizadoras.

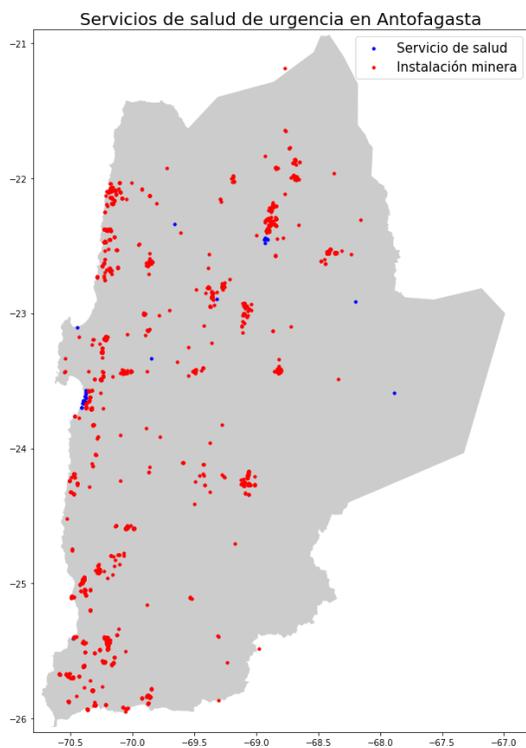


Figura 35: Servicios de urgencia e instalación minera en Antofagasta. Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, para el acceso a los servicios de salud solo se realiza el cálculo para las instalaciones que pertenezcan a faenas de categorías del tipo C y D, ya que se asume que las del tipo A y B cuentan con servicios internos de salud.

#### 6.5.2.4. Coordinación entre empresas

El factor de coordinación entre empresas se determina contando la cantidad de dueños distintos que hay en un territorio de 25 km<sup>2</sup>. Cuanto más dueños distintos existan, más vulnerable será la zona, debido a que habrá una mayor dificultad a la hora de implementar algún plan de adaptación que requiera coordinar compromisos entre las empresas involucradas.

## 6.6. Normalización de los factores

Tal como se mencionó en la 5.1.2. los factores deben ser representados por índices que permitan comprender el grado de amenaza, exposición y vulnerabilidad de los subcomponentes. Siguiendo las recomendaciones metodológicas de GIZ and Eurac, se procede a normalizar en valores entre 0 (sin exposición/vulnerabilidad/amenaza o no medido) y 1 (altamente expuesto/vulnerable/amenazado) cada uno de los componentes del riesgo. Este paso es de suma relevancia ya que son éstos los índices que son utilizados para la estimación del riesgo. Por lo tanto, al ser una interacción entre valores que van desde 0 a 1, el índice de riesgo tendrá el mismo rango.

Dicha normalización es de carácter lineal, utilizando la siguiente ecuación propuesta por la metodología:

$$X_{i,0 a 1} = \frac{X_i - X_{Min}}{X_{Max} - X_{Min}}$$

*Ecuación 2: Normalización de índices. Fuente: GIZ and Eurac, 2017.*

Siendo:

- $X_{i,0 a 1}$ : El índice de exposición/vulnerabilidad/amenaza del subcomponente  $i$  que tendrá valor entre 0 y 1
- $X_i$ : Valor a normalizar
- $X_{Min}$ : El mínimo valor considerado como umbral
- $X_{Max}$ : El máximo valor considerado como umbral

Es importante recalcar que los umbrales son valores que indican el límite en el cual la exposición/vulnerabilidad/amenaza representan una extrema exposición/vulnerabilidad/amenaza (o baja).

### 6.6.1. Normalización de amenazas

Considerando lo anterior, se deben establecer los umbrales de las amenazas. Para cada uno de los mapas de amenazas (precipitaciones, sequía y olas de calor), se definen los umbrales en base a la cantidad de pixeles de 25 km<sup>2</sup> que se ven afectados por los índices climáticos (milímetros de precipitaciones caídas, días consecutivos de sequía y días con una temperatura máxima superior a 30 grados).

A continuación, se presenta la tabla que resume los umbrales que son utilizados para la normalización de los índices:

Amenaza	Cálculo del umbral mínimo	Umbral mínimo de amenaza	Cálculo del umbral máximo	Umbral máximo de amenaza (95 percentil)
Precipitaciones extremas (P)	$\text{Min}(\Delta P_{\text{presente y futuro}})$	0	$\Delta 95th_{\text{presente y futuro}}$	3.14 mm
Olas de calor (OC)	$\text{Min}(\Delta OC_{\text{presente y futuro}})$	0	$\Delta 95th_{\text{presente y futuro}}$	122 días
Sequía (S)	$\text{Min}(\Delta S_{\text{presente y futuro}})$	-924	$95th_{\Delta(\text{presente y futuro})}$	22 días

*Tabla 20: Umbrales de amenazas. Fuente: Elaboración propia.*

Como se observa, el umbral mínimo para las tres amenazas corresponde al mínimo de la diferencia entre la situación presente y futura. Por otro lado, el umbral máximo corresponde al percentil 95 de las diferencias entre ambos periodos. Esto último indica que los píxeles que tengan un índice climático cercano al umbral mínimo tendrán una amenaza que tiende a cero, mientras que los píxeles que muestren un índice igual o superior al percentil 95, se asociará un grado de amenaza igual a uno (muy alta).

### 6.6.2. Normalización exposición

Para llevar a cabo la normalización de las instalaciones contenidas en un píxel, se determinan los umbrales que implican una baja y alta exposición. Para luego normalizar en base a la fórmula recomendada por la metodología (ver Ecuación 2).

Se establecen los siguientes valores como mínimos y máximos del umbral:

Umbral	Valor
$X_{Min}$	0
$X_{Max}$	Percentil 95 de la cantidad de instalaciones por píxel de cada subcomponente

Tabla 21: Umbrales de exposición. Fuente: elaboración propia.

Considerando los umbrales de la tabla anterior, a continuación, se presentan los valores correspondientes según cada subcomponente:

Subcomponente	Umbral mínimo de exposición	Umbral máximo de exposición (95 percentil)
Explotación mina	0	6
Depósitos RMM	0	4
Plantas de procesamiento	0	6
Instalaciones de apoyo	0	9

Tabla 22: Umbrales mínimos y máximos de exposición. Fuente: Elaboración propia.

De esto último, se concluye que cada grilla de 25 km<sup>2</sup> que contengan una cantidad mayor o igual al 95 percentil de instalaciones, tendrán un índice de exposición igual a 1. Mientras que los valores entre el umbral mínimo y el percentil 95 son normalizados en base a la ecuación.

### 6.6.3. Normalización vulnerabilidades

Se establecen los umbrales para los factores de vulnerabilidad, excepto para el factor que representa el tamaño de las faenas, ya que éste se le asigna un índice entre 0 y 1, lo que conlleva a que no sea necesaria una normalización. Para el resto de los casos los umbrales son los siguientes:

Factor	Umbral mínimo de vulnerabilidad	Cálculo umbral máximo	Umbral máximo de vulnerabilidad
Pendiente del terreno	0 grados	Las regiones inestables representan aquellas en que la probabilidad de una remoción en masa es considerable. En estos casos, la pendiente promedio es mayor a 30 grados (Baeza, B., et al, 2004). Por lo tanto, se considera una pendiente de 35 grados como el umbral máximo.	35 grados
Acceso aguas de mar	0 km	Max(Distancias mínimas a agua de mar)	162 km
Acceso servicios de urgencia	0 km	En una situación de emergencia, llegar a tiempo a un servicio de salud es de vital importancia. Se considera como tiempo máximo 1 hora para alcanzar algún servicio de urgencia.	100 km
Coordinación entre empresas	0 dueños distintos	Max(Cantidad de dueños distintos en una grilla de 25 km <sup>2</sup> )	37 dueños distintos

Tabla 23: Umbrales mínimo y máximos de factores de vulnerabilidad. Fuente: Elaboración propia.

En base a estos umbrales, se realiza la normalización siguiendo la misma Ecuación 2. En consecuencia, todos los factores de vulnerabilidad tendrán un índice entre 0 y 1.

## 7. Resultados: Amenazas, exposición, vulnerabilidades y riesgo

Luego de normalizar los índices, se procede a elaborar los mapas definitivos para cada componente del riesgo, para finalmente dar paso al cálculo del riesgo en sí.

### 7.1. Mapas de amenazas

Recordando que los índices deben estar dentro de un rango entre 0 (escasa amenaza o no observada) y 1 (extrema amenaza), y utilizando los umbrales expuestos en la sección anterior, se obtienen los mapas de amenazas los cuales contienen los índices normalizados. A continuación, se observan los 3 mapas:

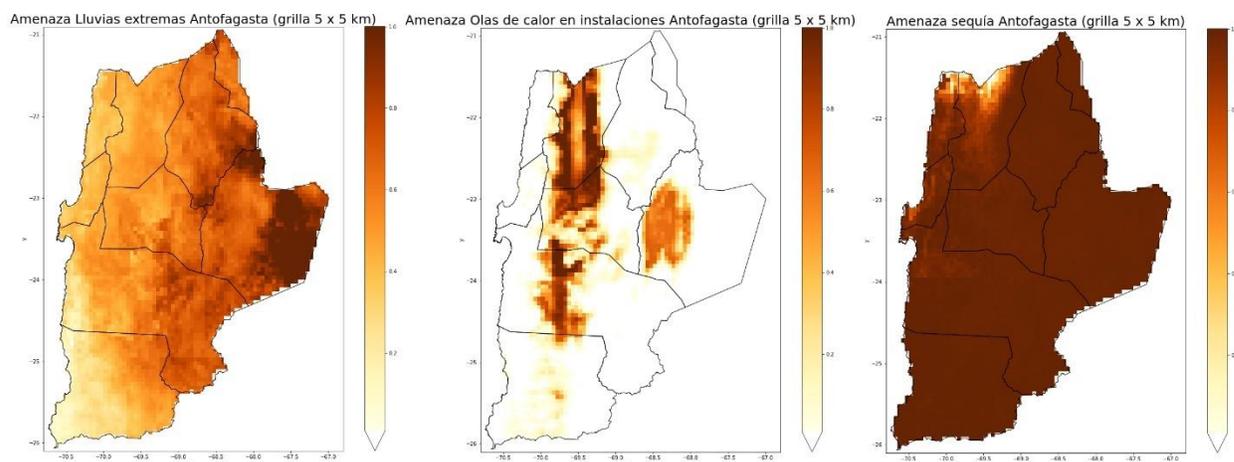


Figura 36: Mapas de amenazas normalizados. Fuente: Elaboración propia

Dado que los mapas provienen de un repositorio que contiene índices climáticos a nivel país, se pueden apreciar los índices en la totalidad del territorio de Antofagasta.

Colores cercanos al blanco señalan una menor amenaza, mientras que colores más oscuros son sinónimos de una amenaza mayor. De las figuras, se puede desprender unas primeras interpretaciones de la situación.

Para el caso de lluvias extremas, se ve un notable aumento de la amenaza para sectores cordilleranos, en contraste con los costeros. La comuna más afectada sería San Pedro de Atacama, mientras que el caso opuesto se encuentra en Taltal.

Respecto a las olas de calor, se puede apreciar un considerable aumento en la amenaza al centro de la región, especialmente en las comunas de María Elena, Sierra gorda, y parte de Antofagasta y San Pedro Atacama. Por otro lado, para Tocopilla, Mejillones, Calama y Ollagüe no se observa una amenaza preponderante.

Finalmente, respecto a la sequía, el mapa muestra una evidente amenaza para toda la región. Esto último se condice con la aridez que caracteriza a la zona, la cual se hará aún más severa.

## 7.2. Mapas de exposición

Luego de la normalización de los índices bajo la metodología explicada en el capítulo anterior, se obtienen los mapas de exposición para las 4 subcomponentes. Cada píxel del mapa contiene un índice entre 0 y 1 indicando qué tan expuesta está la zona de 5x5 km (ver Figura 37).

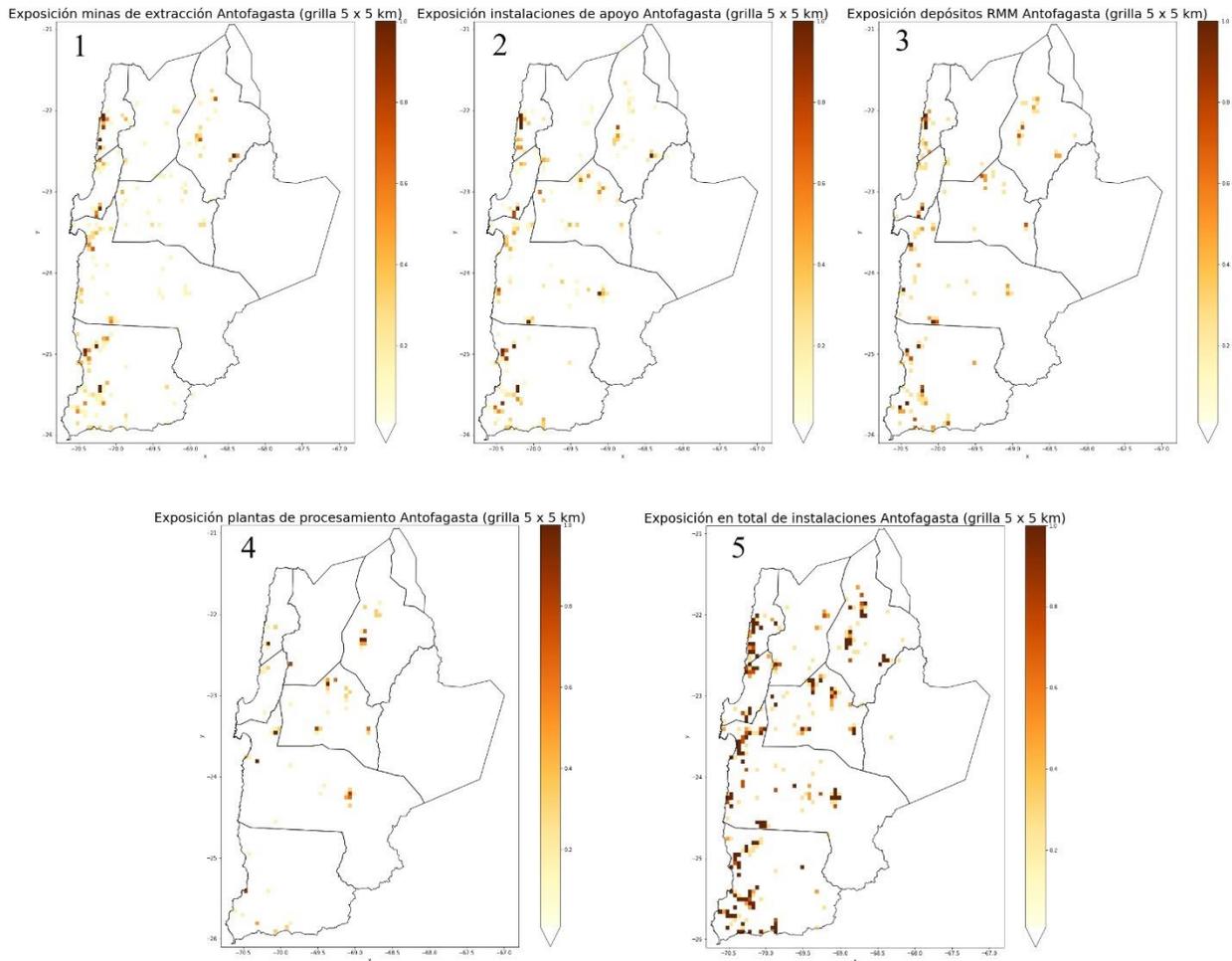


Figura 37: Mapas normalizados y definitivos de exposiciones para cada subcomponente. Fuente: Elaboración propia.

Los tres mapas de exposición ubicados en la parte superior de la figura son utilizados para el estudio del riesgo asociado a lluvias extremas. Mientras que la exposición de plantas de procesamiento compone el riesgo a sequías (mapa 4 de la figura 37); finalmente el último es usado para el estudio que involucra a las olas de calor (mapa 5 de la figura 37).

Generalmente, se observa una mayor exposición para sectores costeros. Esto se da porque existe una mayor concentración de pequeña minería en dicha zona. Por otro lado, en sectores medios y cordilleranos se aprecia una menor exposición, lo cual está relacionado a que la gran minería se suele localizar de manera menos tupida.

### **7.3. Mapas de vulnerabilidades**

Considerando que son cinco riesgos los estudiados, se deben determinar cinco vulnerabilidades.

De acuerdo con lo señalado en la 6.5.2, para cada factor de vulnerabilidad se genera un mapa. Luego, se procede a la determinación de la vulnerabilidad total, la cual se obtiene en base al promedio aritmético de los factores. La forma y cálculo realizado es análogo para las cinco vulnerabilidades necesarias.

#### **7.3.1. Lluvias extremas**

Recordando que el riesgo climático asociado a lluvias extremas se estudia en tres sub componentes (Minas de extracción, Depósitos RMM e Instalaciones de apoyo), para cada una de ellas se determinan los factores de vulnerabilidad correspondientes (tamaño de la faena, coordinación entre empresas y pendiente del terreno). En la Figura 38, se pueden apreciar los mapas de vulnerabilidades según cada uno de los factores mencionados, siendo el mapa 4 el que representa la vulnerabilidad total (media aritmética de los factores). A modo de ilustración, se expone la vulnerabilidad para minas de extracción respecto a lluvias extremas. El caso es análogo para

Instalaciones de apoyo y Depósitos RMM y los mapas correspondientes se encuentran en Anexo C: Mapas de vulnerabilidad de lluvias extremas.

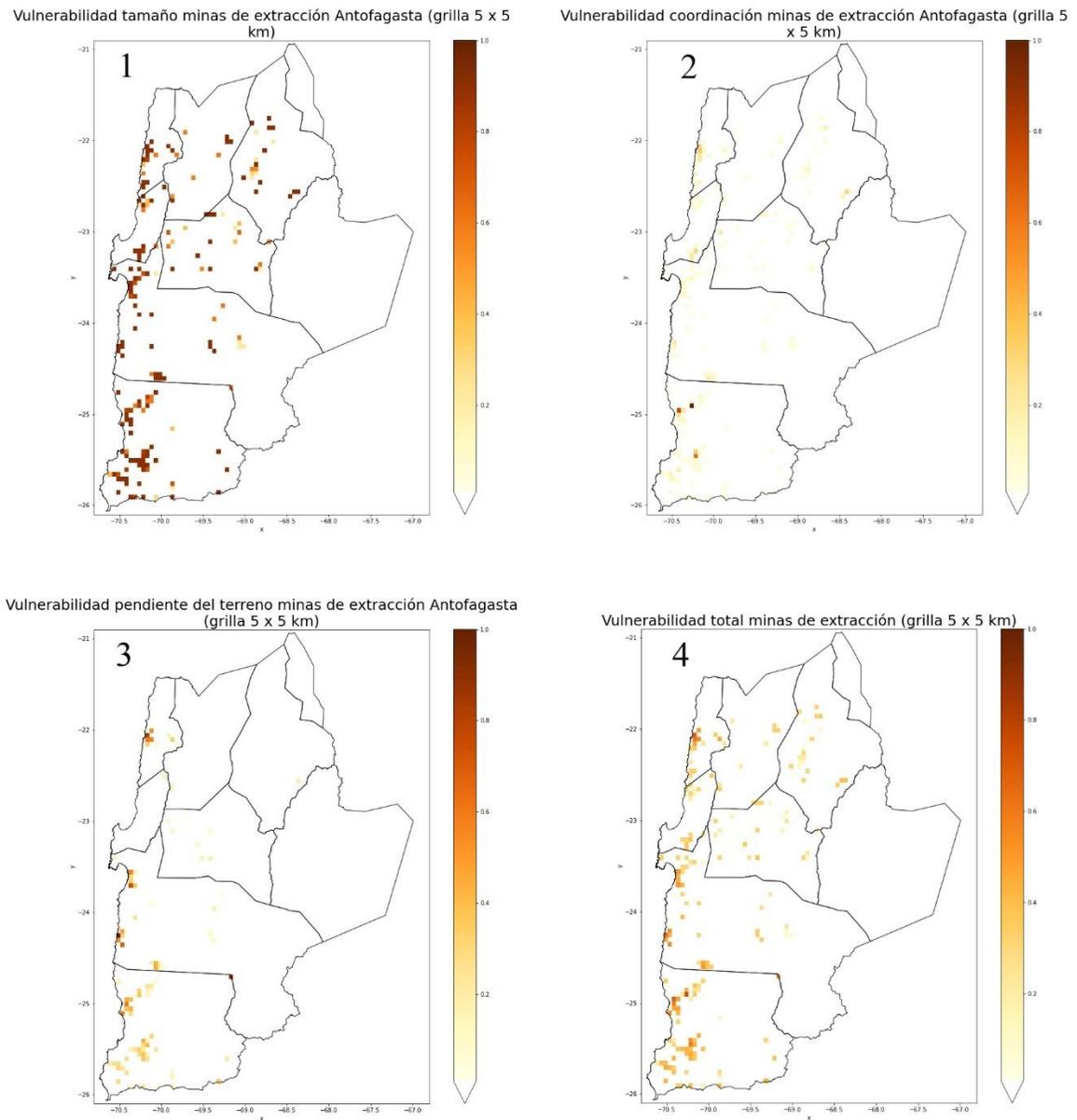


Figura 38: Mapas de vulnerabilidad respecto a lluvias extremas para minas de extracción. Fuente: Elaboración propia.

### **7.3.2. Olas de calor**

El análisis del riesgo asociado a olas de calor se realiza de manera conjunta considerando todas las instalaciones (es decir, no se agruparon en subcomponentes). Lo anterior se debe a que el personal de las minas se pueden encontrar en cualquier tipo de instalación, entonces el análisis se hace de manera general. Por lo tanto, los mapas de vulnerabilidades involucran todas las instalaciones mineras en Antofagasta. En la Figura 39, los mapas 1 y 2 muestran la vulnerabilidad asociada al tamaño de las instalaciones y la coordinación entre empresas, mientras que en el mapa 3 se encuentra la vulnerabilidad respecto a la distancia con servicios de urgencia. Finalmente, en el mapa 4 se puede observar la vulnerabilidad total del sistema respecto a las olas de calor.

En la vulnerabilidad relacionada al tamaño de las instalaciones, se observa una concentración de sectores vulnerables, especialmente en zonas costeras. Esto último se explica por la alta presencia de faenas de la pequeña minería, especialmente en las comunas de Tocopilla, Mejillones y Taltal.

La coordinación entre empresas (mapa 2), indica una vulnerabilidad baja para la mayoría de los puntos. Esto último quiere decir que en una zona de 25 km<sup>2</sup>, generalmente hay pocas instalaciones que pertenezcan a dueños diferentes, lo que facilitaría la coordinación entre empresas en caso de implementar un plan sectorial para la zona.

La vulnerabilidad de distancia a servicios de urgencia (mapa 3) en general es baja. Para las comunas de Tocopilla, Mejillones y Sierra gorda se puede observar que las instalaciones mineras ubicadas en aquellas zonas, no tendrían especiales dificultades para acceder a servicios de urgencias en caso de problemas de salud para sus trabajadores, por lo tanto poseen un índice bajo de vulnerabilidad.

Por otro lado, se observan ciertos puntos altamente vulnerables específicamente en las comunas de Antofagasta, Taltal y Calama.

Finalmente, la vulnerabilidad total para las instalaciones mineras (mapa 4) generalmente es similar para toda la región. De todos modos, se pueden observar ciertas zonas con un índice más alto en las comunas de Antofagasta, Taltal y Calama.

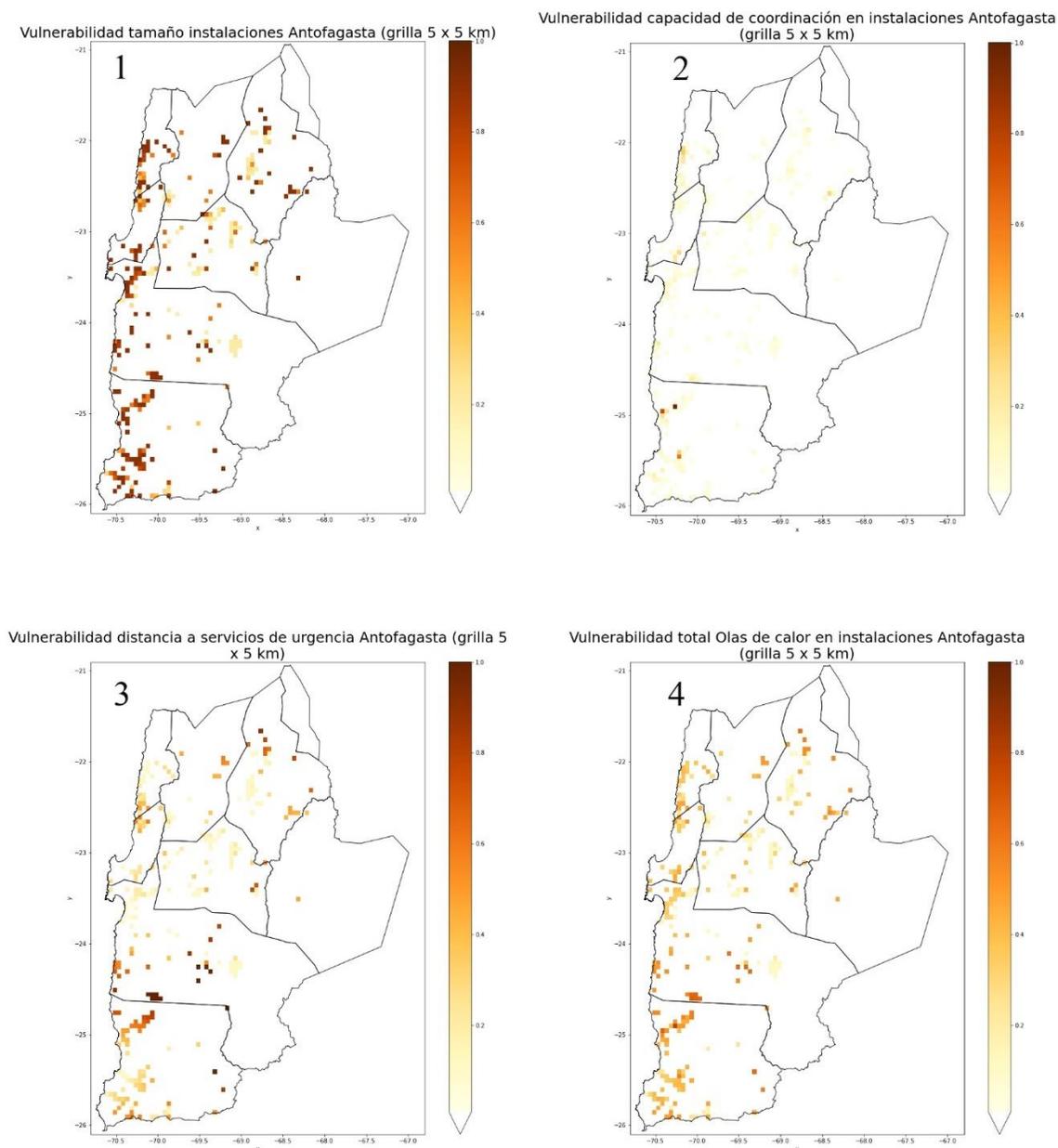


Figura 39: Mapas de vulnerabilidad respecto a olas de calor para instalaciones mineras de Antofagasta. Fuente: Elaboración propia.

### **7.3.3. Sequía**

El riesgo climático relacionado con la sequía es estudiado específicamente para las instalaciones categorizadas en la subcomponente de plantas de procesamiento. Los factores considerados son: tamaño de plantas de procesamiento (mapa 1), coordinación entre empresas (mapa 2), y distancia a acceso a plantas desalinizadoras (mapa 3). La vulnerabilidad total se encuentra en cuarto el mapa (Ver Figura 40).

En general, se observa una baja vulnerabilidad respecto al tamaño para las plantas de procesamiento. Eso se debe a que la pequeña minería no suele contar con este tipo de instalaciones, por lo tanto en el análisis la mayoría de los puntos corresponden a instalaciones de la gran minería (las cuales tienen menor vulnerabilidad debido a su capacidad de adaptación). Considerando la coordinación el análisis es similar, observando una baja vulnerabilidad en el factor.

La vulnerabilidad asociada al acceso a aguas desalinizada es evidentemente menor en sectores costeros, especialmente en instalaciones ubicadas en las comunas de Tocopilla y Mejillones. Caso contrario es Calama, lugar donde se hayan plantas procesamiento que tendrían dificultades para acceder a aguas de mar. En Sierra gorda y Antofagasta se observan casos más variados. Esto se atribuye a que en aquellas comunas hay instalaciones que ya cuentan con acceso a plantas

desalinizadoras, por lo que el factor de vulnerabilidad disminuye de acuerdo con el porcentaje de agua de mar que utilizan actualmente.

Por último, el mapa de vulnerabilidad total (mapa 4) da muestra que en general las plantas de procesamiento de la región tienen una vulnerabilidad media, entre 0.2 y 0.6.

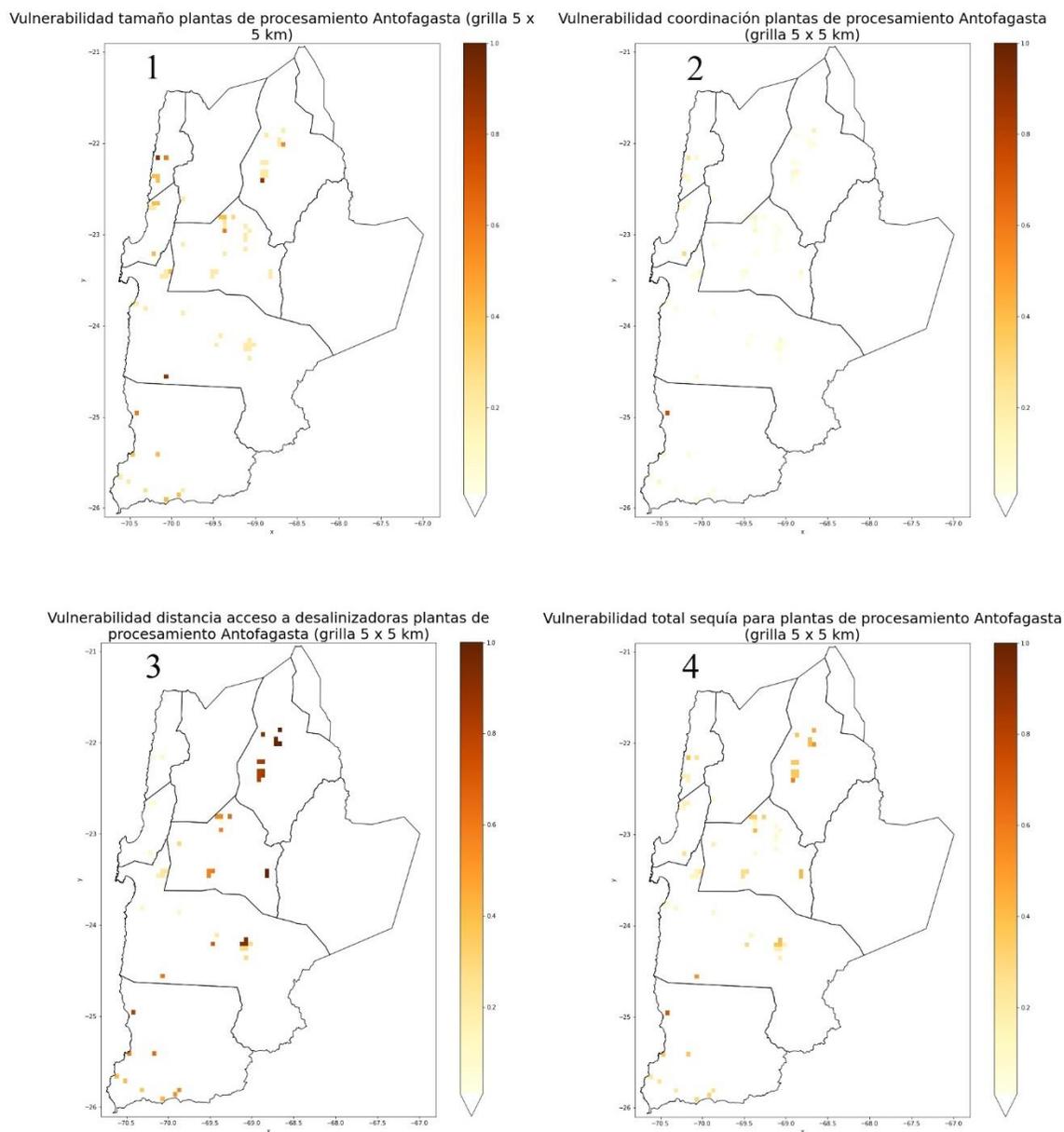


Figura 40: Vulnerabilidad respecto a sequía para plantas de procesamiento. Fuente: Elaboración propia.

## 7.4. Mapas de riesgo climático

Teniendo en cuenta los resultados de los índices de amenazas, vulnerabilidades y exposiciones, se procede a la determinación de los cinco riesgos climáticos declarados en la 6.3:

1. Riesgo de lluvias extremas en instalaciones de apoyo
2. Riesgo de lluvias extremas en depósitos RMM
3. Riesgo de lluvias extremas en minas de extracción
4. Riesgo de olas de calor en instalaciones mineras
5. Riesgo de sequía en plantas de procesamiento

Como se ha mencionado anteriormente, el riesgo se determina en base a la media aritmética de los tres factores que lo componen (Ecuación 1: Cálculo del riesgo climático), y es análogo para los cinco casos mencionados. A continuación, se presentan los resultados.

### 7.4.1. Lluvias extremas

Riesgo Lluvias extremas en instalaciones de apoyo Antofagasta (grilla 5 x 5 km)

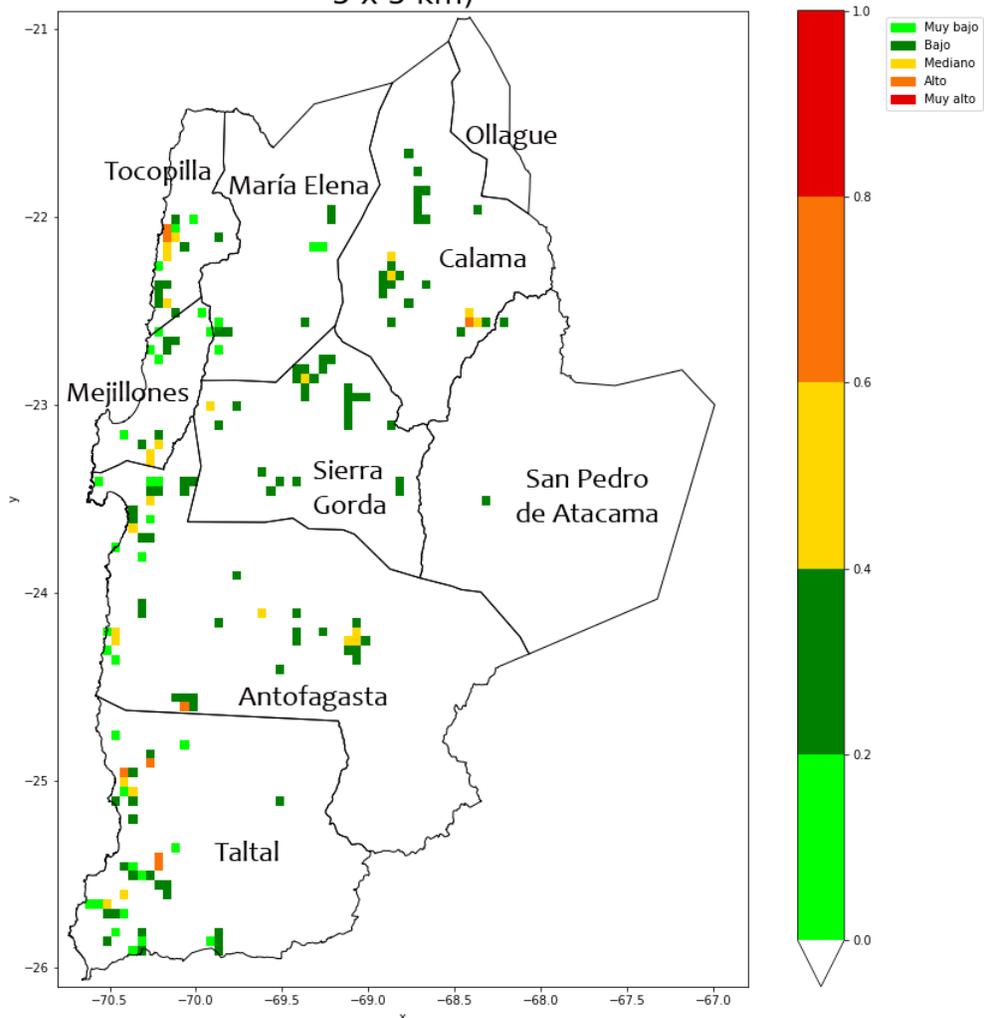


Figura 41: Riesgo por lluvias extremas en instalaciones de apoyo en Antofagasta (grilla 5 x 5 km). Fuente: Elaboración propia.

El riesgo de lluvias extremas en instalaciones de apoyo generalmente se encuentra en un rango bajo o muy bajo, aunque se observan ciertas zonas en las que se llega a un riesgo mediano y alto (ver Figura 41). Los sectores en los que se observan un riesgo mediano o alto son: costa de Tocopilla, Antofagasta y Taltal y el límite entre Calama y San Pedro de Atacama.

Riesgo Lluvias extremas en depósitos RMM Antofagasta (grilla 5 x 5 km)

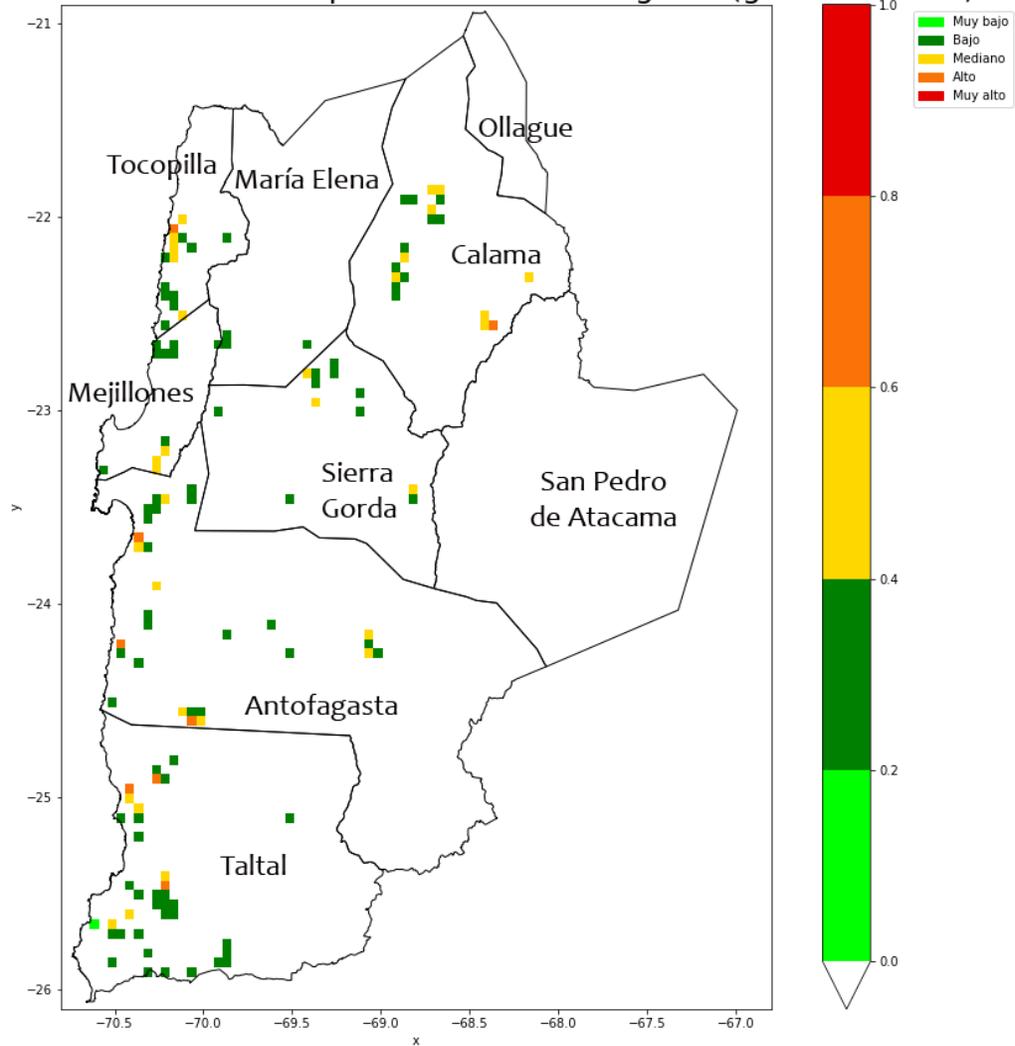


Figura 42: Riesgo por lluvias extremas en depósitos RMM de Antofagasta (grilla 5 x 5 km). Fuente: Elaboración propia.

Similar al caso anterior, el riesgo de lluvias extremas en depósitos RMM generalmente es bajo, aunque se pueden apreciar ciertos sectores con un riesgo mediano, especialmente en zonas costeras. Esto último puede darse debido a que las pendientes de los terrenos son mayores en dichos lugares, lo que podría someter a los depósitos a deslizamientos de tierra o inundaciones que provocan severos daños medio ambientales debido a los elementos altamente tóxicos presentes en los depósitos. Las comunas que más que serían más afectadas son: Tocopilla, la zona costera de Antofagasta, Taltal y la zona de Calama que colinda con San Pedro de Atacama (ver Figura 42).

### Riesgo Lluvias extremas en minas de extracción Antofagasta (grilla 5 x 5 km)

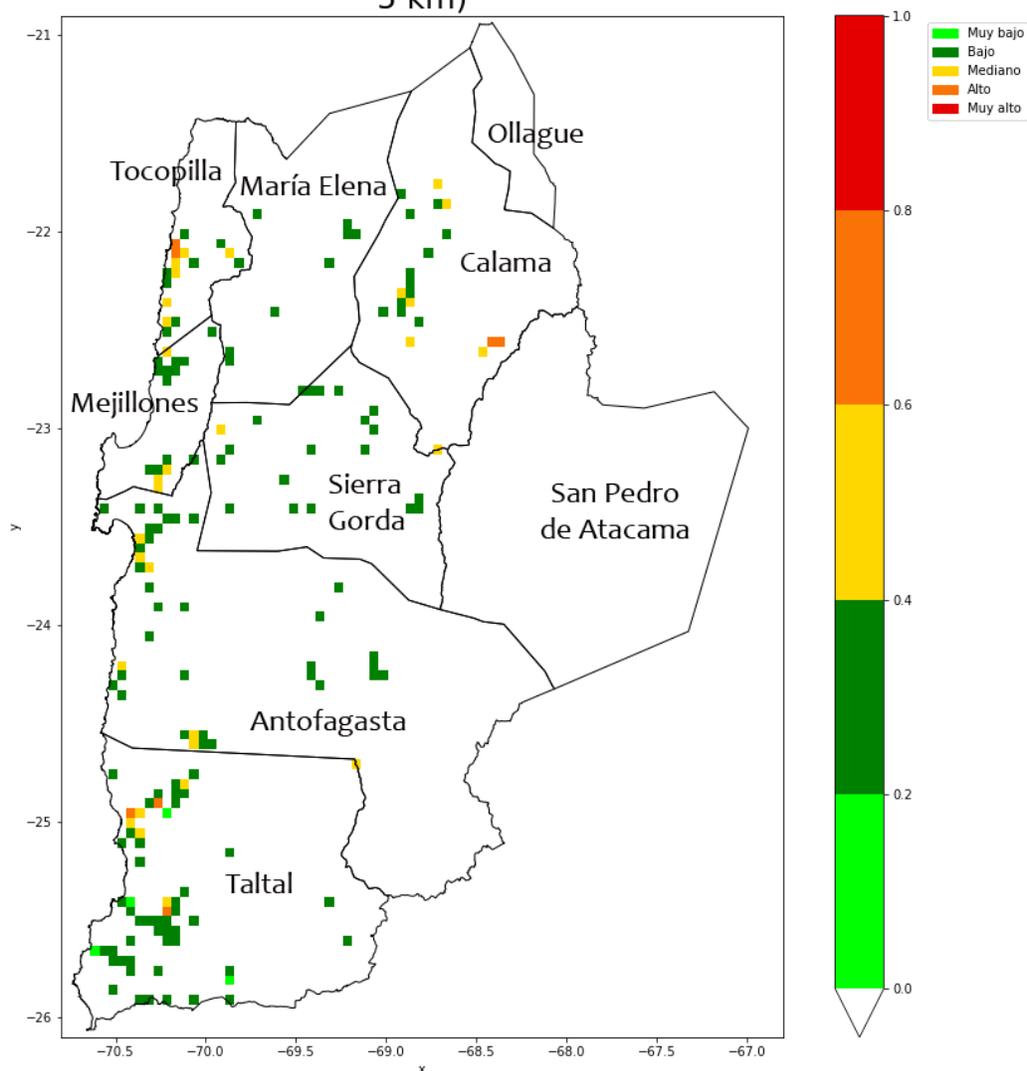


Figura 43: Riesgo por lluvias extremas para minas de extracción de Antofagasta (grilla 5 x 5 km). Fuente: Elaboración propia.

Las lluvias extremas en minas de extracción presentan un grado de riesgo similar a los dos casos anteriores, destacando el riesgo bajo en la zona central de la región (Sierra gorda, María Elena, y parte de Antofagasta). A su vez, se vuelve a resaltar un riesgo mayor para las minas ubicadas en el sector costero (Tocopilla, Mejillones, sector costero de Antofagasta y Taltal). Por último, en la zona de Calama que colinda con San Pedro de Atacama, se puede apreciar que dicho lugar posee un alto riesgo (ver Figura 43).

#### 7.4.2. Olas de calor

De acuerdo con el resultado obtenido (ver Figura 44), las olas de calor pondrán en un mayor riesgo a la mayoría de los y las trabajadoras de la región. Incluso, la zona central (Sierra Gorda) posee un alto riesgo con un índice cercano a 0.8, lo que daría muestra que la salud de las personas que estén presentes en las instalaciones de dicho lugar se verían enfrentados a hostiles panoramas de calor, los cuales afectarían severamente la integridad de la gente. Por otro lado, en zonas costeras si bien el riesgo es menor continúa siendo de grado medio, especialmente en la comuna de Taltal.

Riesgo Olas de calor en instalaciones Antofagasta (grilla 5 x 5 km)

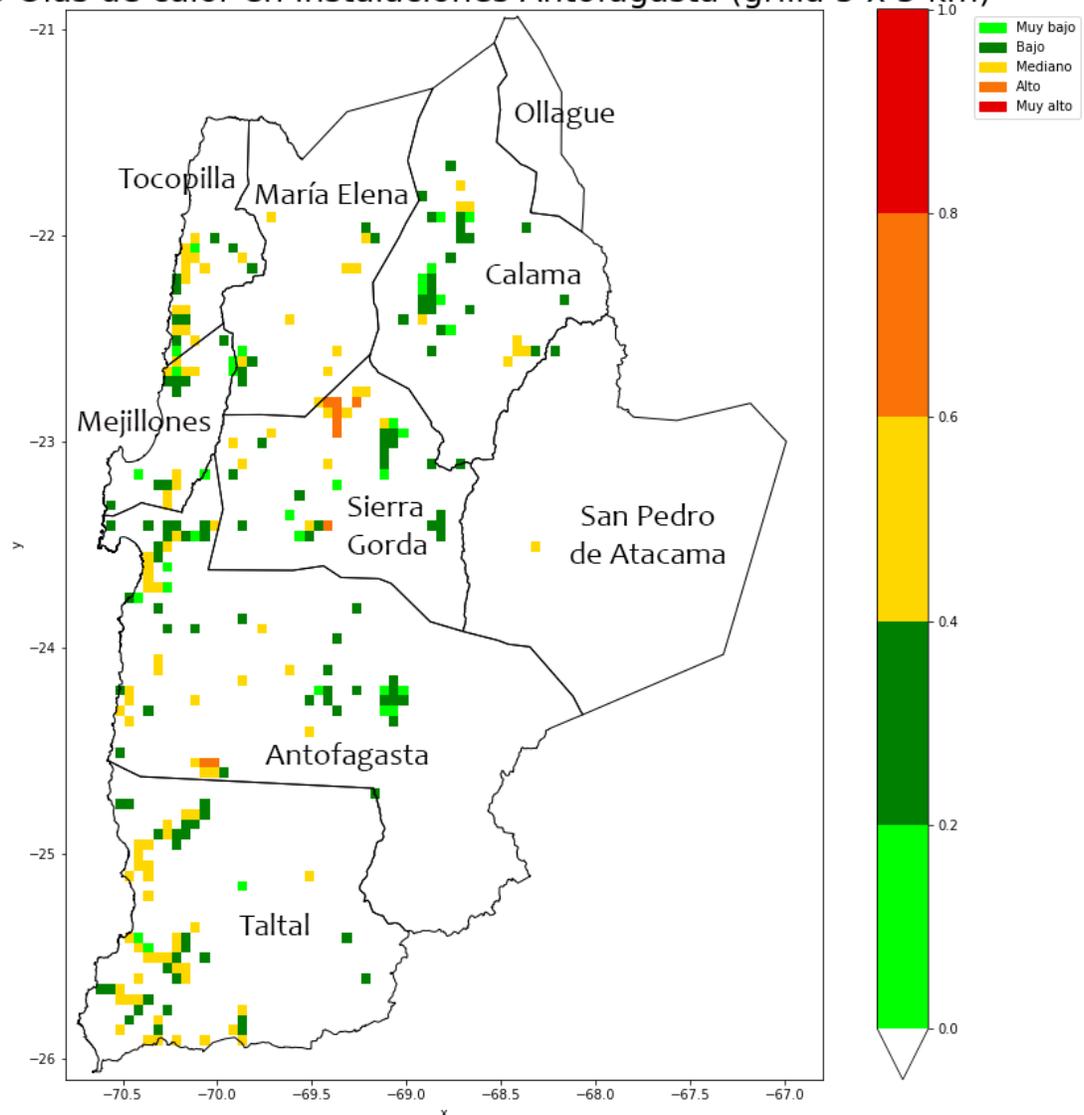


Figura 44: Riesgo por olas de calor en instalaciones de Antofagasta (grilla 5 x 5 km). Fuente: Elaboración propia.

### 7.4.3. Sequía

Considerando que la sequía caracteriza a la región, el riesgo relacionado a este fenómeno a primera vista es más alto comparado con los cuatro anteriores. De todos modos, en las zonas costeras se observa cierta baja lo cual está estrechamente relacionado a la cercanía que tienen dichos puntos a plantas desalinizadoras. Al centro de la región (Sierra gorda), se pueden apreciar ciertos sectores en los cuales el riesgo es mediano a pesar de estar a distancias similares a plantas desalinizadoras en comparación con los puntos de alto riesgo. Esto último está dado a que existen plantas de procesamiento que, si bien están lejos de las aguas de mar, ya cuentan con acceso a este tipo de recurso, por ende, el riesgo con respecto a la sequía disminuye. Finalmente, en la comuna de Calama se hallan las zonas en las cuales las plantas procesamientos se enfrentarían a un alto riesgo de sequía (ver Figura 45).

Riesgo sequía plantas de procesamiento Antofagasta (grilla 5 x 5 km)

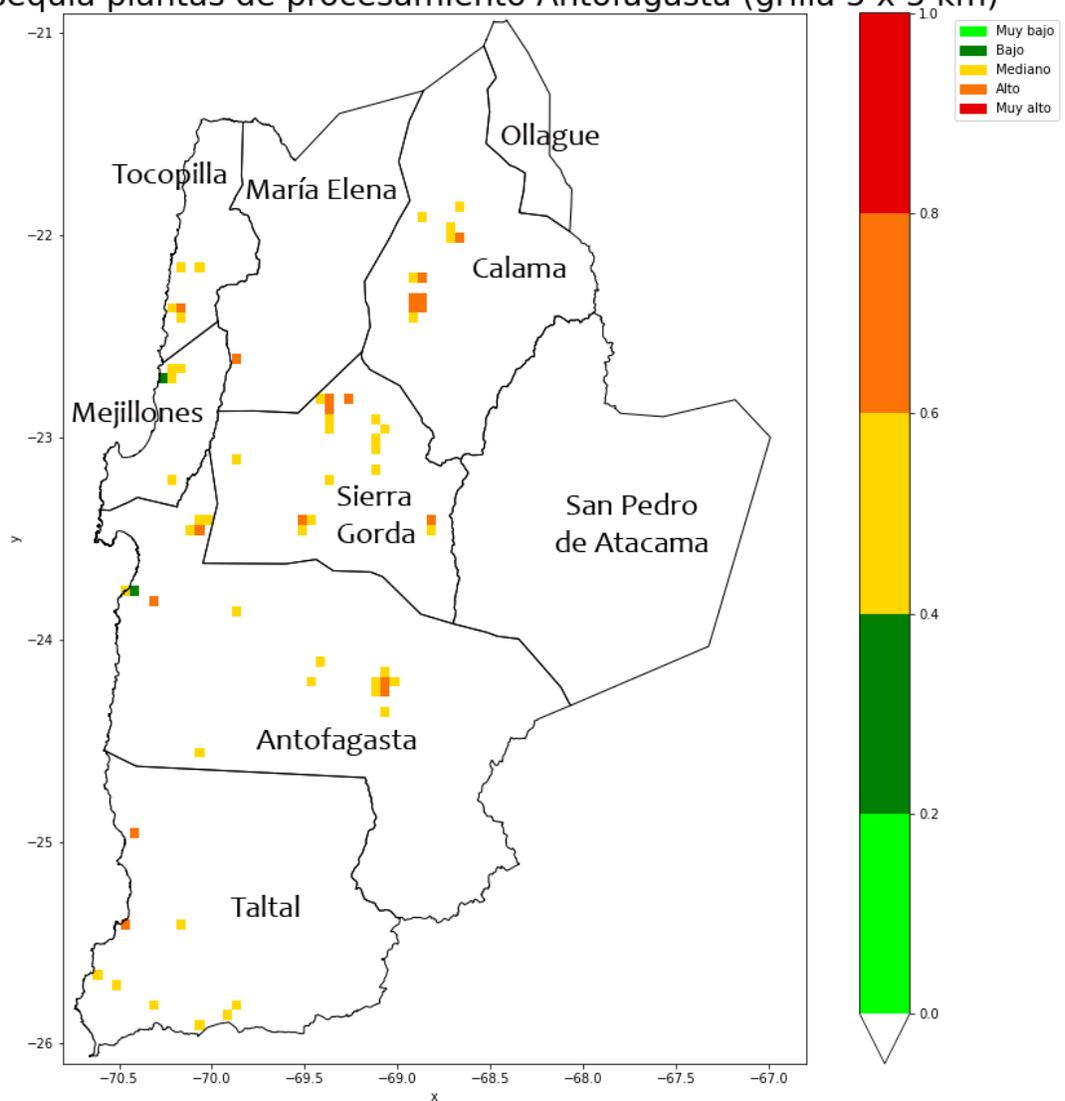


Figura 45: Riesgo por sequía en plantas de procesamiento de Antofagasta (grilla 5 x 5 km). Fuente: Elaboración propia.

## **8. Análisis y conclusiones**

### **8.1. Ejemplo uso de los mapas**

Dado los resultados obtenidos, es necesario entender qué tipo de uso se le puede dar a los mapas de riesgo climático.

Como se ha mencionado, los mapas de riesgo son insumos para la elaboración de planes de adaptación sectorial para el cambio climático. De acuerdo con la CMNUCC, se definen ocho pasos para la construcción de un plan, siendo en el tercer paso donde las vulnerabilidades y riesgos son relevantes (Ver Anexo B: Elaboración de planes de Adaptación sectoriales):

- Paso 3: Analizar los escenarios climáticos y sus posibles impactos, sobre componentes vulnerables del respectivo sector, incluyendo análisis y manejo de riesgo ante eventos climáticos extremos (MMA, 2017).

Considerando que la implementación de planes sectoriales requiere de nuevas capacidades y recursos adicionales, se deben destinar esfuerzos para buscar financiamiento tanto nacional como internacional. En este sentido también será útil contar con criterios de priorización que permitan una implementación más eficiente y eficaz (MMA, 2017).

Uno de los principales criterios consiste en priorizar las medidas de adaptación dirigidas a los grupos más vulnerables y los sectores más pobres de la población, donde los efectos del cambio climático podrían tener un impacto mayor (MMA, 2017). En el informe PANCC II relacionan esto último con utilizar las vulnerabilidades como criterio de priorización. Pero considerando que el riesgo climático engloba a la vulnerabilidad interactuando con la amenaza y exposición, el estudio de éste podría dar una perspectiva aún más profunda cuando se trata de priorización.

Por lo tanto, en el contexto de elaboración de planes sectoriales de adaptación, los resultados serían insumos para: Analizar escenarios climáticos y sus posibles impactos sobre componentes vulnerables de un sector; y como criterio de priorización de sectores para la implementación del plan.

A modo ilustrativo, se puede considerar la elaboración de un plan de adaptación para el sector minero. La minería es un caso complejo, el cual involucra diversas perspectivas: productivas, económicas, comunidades, ecosistemas, salud, entre otras, por lo que el plan podría abordar más de alguna de ellas. Simplificando el ejemplo, se hará un enfoque en salud en minería y se considerará el impacto de olas de calor.

#### **8.1.1. Adaptación a las olas de calor**

Como se indica en la recopilación bibliográfica de la 6.2.1.1, las olas de calor pueden llegar a provocar serios problemas en la salud, poniendo en evidente riesgo a los trabajadores de las minas. Para hacer frente a esta amenaza, se deben tomar ciertas medidas para adaptarse y así cuidar al personal. Por lo tanto, se realiza el supuesto de que un Plan de adaptación para el sector minero, tiene una arista que involucra el fenómeno de las olas de calor y la salud de los trabajadores.

Existen diversas medidas de adaptación para enfrentar olas de calor en la minería. Para el ejemplo del caso, se asume que el Plan sectorial considera la implementación de medidas que durante los años ha implementado la minería en Australia:

- Acceso a especialistas que eduquen a trabajadores para prevenir riesgos de salud (Mason, L. et al., 2013).
- Establecer protocolos que aseguren que los trabajadores estén aclimatados (Mason, L. et al., 2013).
- Test de deshidratación y tarjetas de aclimatación, al menos una vez por turno (Leveritt, 1998)
- Sistemas de aire acondicionado eficientes y de bajo impacto (Mt Isa Mines, 2001)

Teniendo en cuenta estas cuatro posibles medidas de adaptación, se hace evidente que implementar medidas de acción que aseguren sistemas de aire, test de deshidratación y un plan educacional para los trabajadores, requieren una disponibilidad de recursos y una logística que hace difícil una implementación paralela para todo el sector a la vez. Por lo tanto, es necesario priorizar los sectores en dónde enfocar recursos y hacer eficiente la adaptación.

De manera particular, se pueden considerar como sectores prioritarios a lugares que posean un riesgo mediano o alto respecto a las olas de calor, enfocando los recursos en ellos. Observando la Figura 46, se encuentran diversas zonas que cumplen con la condición de riesgo mencionada, siendo la más complicada el sector norte de Sierra Gorda.

Por lo tanto, para una implementación eficiente de las medidas de adaptación, se pueden considerar como zonas prioritarias las indicadas en la Figura 46.

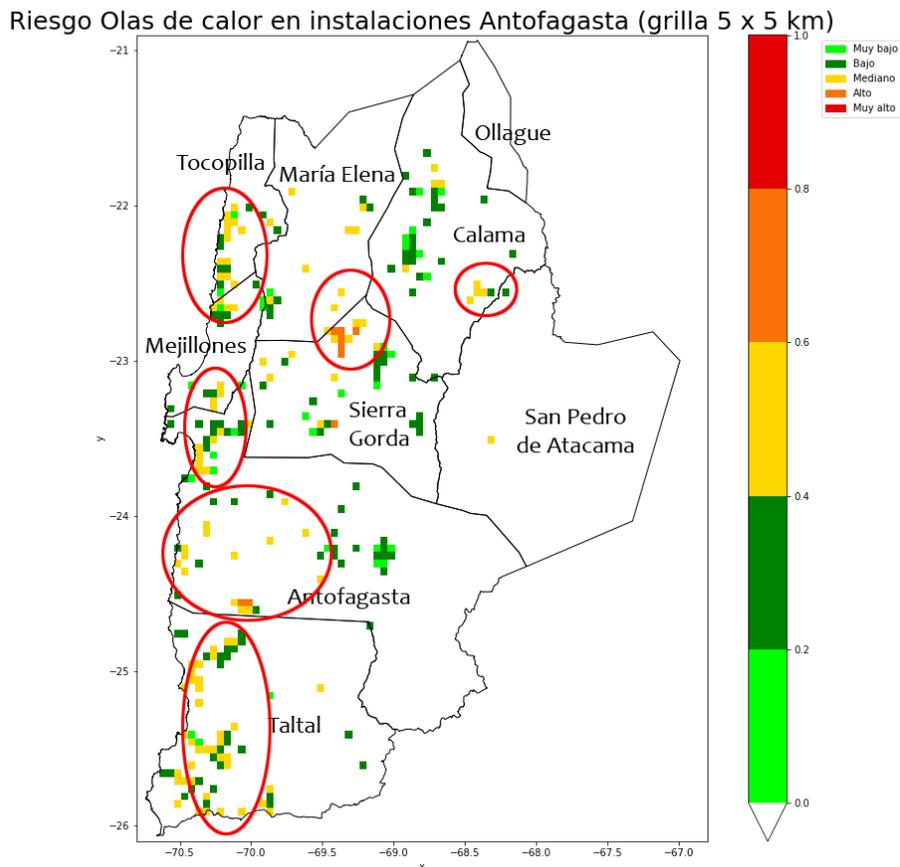


Figura 46: Zonas de mediano y alto riesgo respecto a olas de calor en Antofagasta. Fuente: Elaboración propia.

Este criterio de priorización es un insumo para el abordar el paso 5 de elaboración de un plan sectorial (Ver Anexo B: Elaboración de planes de Adaptación sectoriales). Además, es importante destacar que este tipo de análisis debe ser complementado con criterios que consideren la interacción con las comunidades, integrando una perspectiva social del impacto climático.

## 8.2. Consideraciones importantes de los resultados

Dependiendo de la perspectiva del uso de los resultados, los cinco riesgos obtenidos pueden ser útiles o no. Por ejemplo, en el caso de querer evaluar perjuicios económicos por lluvias extremas en minas de extracción, los mapas relacionados no aportarían con información suficiente para determinar qué zonas serían efectivamente perjudicadas en lo económico, ya que la metodología se basa en contar la cantidad de instalaciones en una zona que está expuesta a una determinada amenaza y en base a su vulnerabilidad determinar su riesgo. Esto último deja de lado la producción que está riesgo. Agrupa dentro del mismo análisis instalaciones que pertenecen a la pequeña minería junto con la gran minería, lo que provoca distorsiones si se quiere estudiar pérdidas monetarias debido al cambio climático. Lo anterior, se podría solucionar estableciendo el riesgo por tamaño de faenas, dividiendo el análisis caso a caso. Siguiendo con el mismo ejemplo, en caso de que el mapa de riesgo de lluvias extremas se mire desde una perspectiva de salud, su uso será directo. En este caso, la agrupación de instalaciones de diferentes tamaños no distorsiona el análisis, sino que efectivamente vienen a contribuir a la identificación a zonas donde las lluvias extremas pueden poner en riesgo a la integridad de los trabajadores. Por lo tanto, considerando

estos ejemplos, se puede dilucidar que dependiendo de las perspectiva del análisis, los resultados del presente trabajo aportan o no el valor suficiente para la elaboración de planes de adaptación.

Otra consideración importante, es que la metodología toma la situación actual de la minería, dejando de lado proyecciones, tendencias y estimaciones de ésta. Entonces, ciertos riesgos obtenidos, en el futuro no tendrán la misma relevancia que en la actualidad. Por ejemplo, el estudio del riesgo asociado a la sequía considera como principal factor de vulnerabilidad el acceso a aguas de mar (de la situación presente). Para el periodo 2019-2030, se proyecta que el uso de aguas desalinizadas aumentaría un 156%, llegando a representar el 47% del agua requerida por la minería del cobre a nivel nacional (Cochilco, 2020). Esta tendencia, dejaría obsoleto el análisis realizado en caso de ser utilizado en 10 años más. Se debe tener en cuenta que el estudio hecho toma la situación actual (asumiendo que no cambia) y lo proyecta en el futuro. Por lo tanto, los resultados obtenidos debiesen ser utilizados como una herramienta para entender “qué pasaría si la situación minera no cambia y enfrenta amenazas climáticas en el futuro mediano”, lo que orientaría acciones y medidas a considerar para la elaboración de un plan de adaptación dentro de los próximos 2 a 3 años (en el corto plazo).

Una última consideración es el grado de complejidad que puede llegar a tener el estudio del riesgo climático. En el presente trabajo se acota solo al impacto que habría en los subcomponentes de las faenas mineras, además de utilizar datos de acceso público. Dicho análisis puede llegar mayores grados de profundidad, agregando más componentes a la cadena de impacto. Por ejemplo, incorporar los posibles daños ecológicos que podría haber por rebosamientos de depósitos RMM y por ende el riesgo que habría para las comunidades locales; o cómo podría afectar una baja en la producción debido a la sequía a las comunas que dependen económicamente del cobre. Los resultados tienen la particularidad de que pueden ser acoplados a análisis más complejos, alcanzando una mayor profundidad del estudio del riesgo. Pero a su vez, para complejizar el estudio se necesita acceso a datos más desagregados y que involucren ecosistemas y comunidades, lo que conlleva a una mayor dificultad tanto el tratamiento de la información como en la articulación de una cadena de impacto más compleja.

### **8.3. Conclusión**

El estudio del riesgo climático en el sector minero toma especial relevancia ya que es uno de los insumos claves para la generación de planes de adaptación sectorial. A la fecha, la minería nacional no cuenta con un plan, siendo la falta de conocimiento respecto a las vulnerabilidades y riesgos unas de las principales barreras para la elaboración de uno.

La metodología propuesta por GIZ and Eurac la cual fue hecha en base al quinto informe del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático, es la principal referencia cuando se trata de estudios de riesgo y vulnerabilidades. En consecuencia, el análisis de los componentes del riesgo intenta acercarse lo más posible a las recomendaciones brindadas por la metodología.

Por lo tanto, en el presente trabajo se han determinado cinco riesgos climáticos asociados a tres amenazas diferentes: lluvias extremas, olas de calor y sequías. Los resultados obtenidos sirven de insumo para la identificación de riesgos latentes en el sector minero de Antofagasta, y a la vez vienen a contribuir a la priorización de sectores en los cuales destinar mayores recursos y esfuerzos, para así alcanzar una implementación de un Plan de Adaptación sectorial más eficaz y eficiente. Esto último se ve facilitado dado la categorización del riesgo, que de acuerdo con un índice se le asigna un nivel de riesgo (muy bajo, bajo, mediano, alto y muy alto), siendo representado en colores para una visualización más clara.

De acuerdo con los mapas de riesgos, los de olas de calor y sequía son los que presentan una mayor cantidad de zonas con un nivel entre mediano y alto. La comuna de Sierra Gorda es la que presenta lugares con riesgos altos en comparación con el resto de la región, por lo que un plan de adaptación que involucre las amenazas recién mencionadas, debiese considerarla como un lugar prioritario para implementar las medidas pertinentes.

Se debe tener en cuenta que el análisis fue acotado solo a los subcomponentes de las faenas mineras, dejando de lado la inclusión de comunidades y ecosistemas. Añadir los dos eslabones mencionados implica complejizar la cadena impacto, para así obtener un análisis más profundo del riesgo.

El análisis se limitó a fuentes públicas de datos, los cuales no permiten un análisis tan específico. Entonces, la metodología utilizada se puede complejizar si se cuentan con bases de datos más desagregadas, las cuales aportarían más valor al contener: la producción anual por empresa, cantidad de trabajadores según edad y sexo, indicadores económicos por comunas, etc.

Finalmente, se debe tener en mente que los resultados obtenidos si bien pueden servir de insumos para planes de adaptación, dependiendo de la perspectiva, la metodología empleada puede distorsionar ciertos análisis y decisiones. Esto último está dado porque se consideran exposiciones del mismo tipo para las tres amenazas, sumado a que el cálculo de índice del riesgo corresponde a la media aritmética de los tres componentes (amenaza, exposición y vulnerabilidad). De todos modos, los cinco mapas de riesgo climático aportan la información necesaria para al menos poder determinar sectores prioritarios para una implementación de un posible plan de adaptación para el sector minero.

## 9. Bibliografía

ACON, miembro Grupo Inerco, 2015. Implementación del mapa de ruta para la adaptación del sector energético al cambio climático e identificación de factores de vulnerabilidad del sector minero y de líneas gruesas de adaptación. Bogotá, D.C. Recuperado de [ <http://bdigital.upme.gov.co/handle/001/1320?mode=full> ]

Alta Ley. (2019). Gestión de Cambio Climático en la minería del Cobre en Chile. Recuperado el 1 de noviembre de 2021 de [ [https://www.sonami.cl/v2/wp-content/uploads/2019/04/6-Cambio-Climatico\\_MINERIA\\_CESCO\\_12\\_04\\_19.pdf](https://www.sonami.cl/v2/wp-content/uploads/2019/04/6-Cambio-Climatico_MINERIA_CESCO_12_04_19.pdf) ]

AMTC. (Sin Fecha). Acerca del AMTC. Recuperado el 7 de junio 2021 de [ <https://www.amtc.cl/acerca-de-amtc/> ]

Araya-Osses, D., Casanueva, A., Román-Figueroa, C., Uribe, J., Paneque, M. (2020). Climate change projections of temperature and precipitation in Chile based on statistical downscaling. *Climate Dynamics*. 54. 10.1007/s00382-020-05231-4. Recuperado el 1 de junio de 2021 de: [ [https://www.researchgate.net/publication/340538375\\_Climate\\_change\\_projections\\_of\\_temperature\\_and\\_precipitation\\_in\\_Chile\\_based\\_on\\_statistical\\_downscaling](https://www.researchgate.net/publication/340538375_Climate_change_projections_of_temperature_and_precipitation_in_Chile_based_on_statistical_downscaling) ]

ARClím. (2020). Marco Metodológico ARClím (pp. 3–10). Recuperado el 7 de junio de [ <https://arclim.mma.gob.cl/about/> ]

ARClím. (Sin fecha). Cambio de Productividad Cultivo de Almendro. Recuperado el 9 de junio 2021 de [ [https://arclim.mma.gob.cl/atlas/view/agricultura\\_almendra/](https://arclim.mma.gob.cl/atlas/view/agricultura_almendra/) ]

ARClím. (Sin fecha). Sobre Atlas de Riesgo Climático. Recuperado el 9 de junio 2021 de [ <https://arclim.mma.gob.cl/about/> ]

BBC. (23 de enero 2020). “Megasequía” en Chile: las imágenes satelitales que muestran las consecuencias de la escasez de lluvia en el país, la peor desde 1915. Recuperado el 11 de julio de [ <https://www.bbc.com/mundo/noticias-52288489> ]

BCN. (2017). Cambio Climático en Chile, Institucionalidad, Políticas Públicas y Desafíos. Recuperado de: [ [https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/24631/2/CC\\_Institucionalidad\\_PP\\_y\\_carencias\\_Chile\\_2017\\_FINAL.pdf](https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/24631/2/CC_Institucionalidad_PP_y_carencias_Chile_2017_FINAL.pdf) ]

Bio Bio Chile. (23 de junio 2021). Fenómenos climáticos en el norte: Antofagasta con vientos de 100km/h y Coquimbo con intensa lluvia. Recuperado el 9 de julio 2021 de [ <https://www.biobiochile.cl/noticias/nacional/region-de-antofagasta/2021/06/23/fenomenos-climaticos-en-el-norte-antofagasta-con-vientos-de-100-km-h-y-coquimbo-con-intensa-lluvia.shtml> ]

Borja, R., Alcántara, I. (2004). Procesos de remoción en masa y riesgos asociados en Zacapoaxtla, Puebla. *Investigaciones geográficas*, (53), 7-26. Recuperado en 27 de diciembre de 2021, de [ [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0188-46112004000100002&lng=es&tlng=es.](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112004000100002&lng=es&tlng=es.) ]

Cambridge University Press. (2013). The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment report of the IPCC. (pp. 123–127). United Kingdom and New York, NY, USA. United Kingdom and New York, NY, USA.

Centro UC, cambio global, (2019). Recuperado el 9 de julio 2021 desde: [<https://cambioglobal.uc.cl/comunicacion-y-recursos/recursos/glosario/sequia>]

CEPAL. (2017). Portafolio de políticas públicas de adaptación al cambio climático y mitigación de sus efectos con beneficios adicionales o “sin arrepentimiento” en América Latina. Naciones Unidas, junio de 2017.

Ciren. (2016). Antecedentes climáticos II Región Antofagasta. Recuperado el 24 de septiembre de 2021 desde: [<http://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/123456789/26196/CIREN-HUMED048-Clima%20RII.pdf?sequence=1&isAllowed=y>]

Cochilco. (2014). Monitoreo de la mediana y pequeña minería Chilena. Chile Recuperado el 22 de septiembre de 2021 desde [<https://www.cochilco.cl/Listado%20Temtico/Informe%20Med%20Min%2028%2010%202014.pdf>]

Cochilco. (2020). Anuario de estadísticas del Cobre y otros minerales (2000-2019) (pp. 15-18, 97-98). Santiago de Chile, Chile.

Cochilco. (2020). Consumo de agua en la minería del cobre al 2019. Santiago de Chile, Chile. Recuperado de: [[https://www.cochilco.cl/Listado%20Temtico/2020%2010%2030%20Consumo%20de%20agua%20en%20la%20mineria%20del%20cobre%20al%202019\\_version%20final.pdf](https://www.cochilco.cl/Listado%20Temtico/2020%2010%2030%20Consumo%20de%20agua%20en%20la%20mineria%20del%20cobre%20al%202019_version%20final.pdf) ]

Consejo Minero. (2020). Cifras actualizadas de la minería (p. 5). Santiago de Chile, Chile

Conycit. (Sin fecha). Sobre FONDEF. Recuperado el 7 de junio 2021 de [<https://www.conicyt.cl/fondef/sobre-fondef/que-es-fondef/>]

Cooperativa (25 de agosto 2019). Antofagasta: Frente a ola de calor Salud entregó medidas preventivas. Recuperado el 9 de julio de [<https://www.cooperativa.cl/noticias/pais/region-de-antofagasta/antofagasta-frente-a-ola-de-calor-salud-entrego-medidas-preventivas/2019-08-25/110534.html>]

Cruden, D. M. (1991). A Simple definition of a landslides: Bulletin of the International Association of Engineering Geology, v 43,p.27-29.

Cruden, D; Varnes, D. (1996). Landslides types and processes. In Landslides. Investigation and Mitigation (Turner, A.K.; Schuster, R.L.; editors). Transportation Research Board, National Research Council. p36-75. Washington.

Dreyfus, J. (2021). Contribución a la definición del sistema de análisis de riesgo climático del sector minero.

ECONSSA. (2013). Sistema de Disposición Final de las Aguas Servidas de Antofagasta.

El Mostrador (4 de diciembre 2020). Arclim, la nueva plataforma que desarrolla mapas de riesgos relacionados con el cambio climático. Recuperado el 10 de julio 2021 de [<https://www.elmostrador.cl/agenda-pais/2020/12/04/arclim-la-nueva-plataforma-que-desarrolla-mapas-de-riesgos-relacionados-con-el-cambio-climatico-en-chile/>]

El rancagüino (30 de enero 2021). Lluvias provocaron deslizamientos de tierra en el mineral El Teniente. Recuperado el 10 de julio 2021 de [<https://www.elrancaguino.cl/2021/01/30/luvias-provocaron-deslizamientos-de-tierra-se-han-producido-en-el-mineral-el-teniente/>]

Energiminas (9 de febrero 2019). Precipitaciones e inundaciones en Chile afectan operaciones mineras de Codelco. Recuperado el 10 de julio 2021 de [<https://energiminas.com/precipitaciones-e-inundaciones-en-chile-afectan-operaciones-mineras-de-codelco/>]

Facso, Universidad de Chile. (Sin fecha) Dirección de investigación y publicaciones. Recuperado el 7 de junio 2021 de [<http://www.facso.uchile.cl/investigacion/direccion-de-investigacion-y-publicaciones/55916/presentación>]

Flores, M. (2016). Agua desalinizada, ¿Solución a la escasez hídrica en la ciudad de Antofagasta, Chile? Recuperado el 15 de mayo de 2021 de: [ <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/143587> ]

Frich, P., Alexander, L. V., Della-Marta, P., Gleason, B., Haylock, M., Klein Tank, A. M. G., Peterson, T. (2002). Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century, National Environmental Research, vol. 19: 193-212, 2002. Recuperado el 10 julio, 2021, de: [[http://www.vsamp.com/resume/publications/Frich\\_et\\_al.pdf](http://www.vsamp.com/resume/publications/Frich_et_al.pdf)]

Gardiner, D. (2012). Physical risks from climate change: a guide for companies and investors on disclosure and management of climate impacts. Ceres, Oxfam America & Calvert Investments. Recuperado el 1 de junio de 2021 de: [ <https://s3.amazonaws.com/oxfam-us/static/oa4/physical-risks-from-climate-change.pdf> ]

GIZ and EURAC (2017): Risk Supplement to the Vulnerability Sourcebook. Guidance on how to apply the Vulnerability Sourcebook's approach with the new IPCC AR5 concept of climate risk. Bonn: GIZ. Recuperado el 1 de octubre 2021 de [ [https://www.adaptationcommunity.net/wp-content/uploads/2017/10/GIZ-2017\\_Risk-Supplement-to-the-Vulnerability-Sourcebook.pdf](https://www.adaptationcommunity.net/wp-content/uploads/2017/10/GIZ-2017_Risk-Supplement-to-the-Vulnerability-Sourcebook.pdf) ]

GIZ. (2014). The Vulnerability Sourcebook. Concept and guidelines for standardized vulnerability assessments. Bonn and Eschborn: GIZ. Recuperado de [ <http://www.adaptationcommunity.net/vulnerability-assessment/vulnerabilitysourcebook/>]

Greenpeace. (2014). [Leiva, S]. Por qué necesitamos una ley de protección de glaciares, marzo de 2014, Santiago, Chile. Extraído desde [https://sites.greenpeace.cl/pdf/debemos\\_cuidar\\_glaciares.pdf](https://sites.greenpeace.cl/pdf/debemos_cuidar_glaciares.pdf)

Grupo Antofagasta Minerals. (2012). Etapas del Proceso Productivo de una Mina (pp. 4–22). Santiago de Chile.

Ingeniería en Minas, FCFM. (27 de enero 2021). Universidad de Chile se adjudica proyecto FONDEF para la gestión del riesgo climático en la minería. Recuperado el 7 de junio 2021 de

[<http://www.minas.uchile.cl/noticias/172939/fondef-para-la-gestion-del-riesgo-del-cambio-climatico-en-mineria>]

IPCC. (2014). Foundations for decision making. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 199-201. Recuperado de [ <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/> ]

IPCC. (2019). Representative Concentration Pathways (RCPs). Recuperado el 24 de septiembre de 2021 desde: [ [https://sedac.ciesin.columbia.edu/ddc/ar5\\_scenarioproces/RCPs.html](https://sedac.ciesin.columbia.edu/ddc/ar5_scenarioproces/RCPs.html) ]

IPCC. (2021). Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)].

Kracht, W. & Salinas Trentini, B. (2021). Minería y Cambio Climático. Síntesis Ejecutiva. Recuperado el 11 de noviembre de 2021 de [ [https://www.researchgate.net/publication/351633861\\_Mineria\\_y\\_Cambio\\_Climatico\\_Sintesis\\_Ejecutiva](https://www.researchgate.net/publication/351633861_Mineria_y_Cambio_Climatico_Sintesis_Ejecutiva) ].

La Tercera. (23 de abril 2020). Sequía en Chile sigue golpeando la producción de mina estrella de cobre de Anglo American. Recuperado el 8 de junio 2021 de [ <https://www.latercera.com/pulso/noticia/sequia-en-chile-sigue-impactando-produccion-de-mina-estrella-de-cobre-de-anglo-american/AQMOSBMI45AZXEV5B4DBXB4BFM/> ]

Leveritt, S. (1998) Heat Stress in Mining. Work-Safe Australia Ergonomics Review, 1998.

Ley N°19.300. Diario Oficial de la República de Chile, 9 de marzo de 1994. Recuperado el 1 de diciembre de 2021 de [ <http://bcn.cl/2f707> ]

Loechel, B., and Franks, D. Sharma, V., van de Graaff, S. (2013). Extractive resource development in a changing climate: learning the lessons from extreme weather events in Queensland, Australia. South Port, QLD, Australia: National Climate Change Adaptation Research Facility. Recuperado de [ <https://espace.library.uq.edu.au/view/UQ:290491> ]

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, pp.79. Recuperado el 1 de octubre 2021 de [ [https://www.preventionweb.net/files/34360\\_s3bib1masonadaptingclimaterisksmini.pdf](https://www.preventionweb.net/files/34360_s3bib1masonadaptingclimaterisksmini.pdf) ]

Maurya, T., Karena, K., Vardhan, H., Aruna, M., Raj, M. G. (2015). Effect of heat on underground mine workers. Procedia Earth and Planetary Science, 11, 491-498. Recuperado de: [ <https://core.ac.uk/reader/82014060> ]

Meteored. (12 de febrero 2020). ¿Cómo se define una ola de calor? Recuperado el 24 de septiembre de 2021 desde: [<https://www.meteored.cl/noticias/ciencia/definicion-de-olas-de-calor-en-chile-monitoreo-continuo.html>]

Minería Chilena (4 de abril 2012). Grandes daños provocó deslizamiento en mina Kennecott Utah Copper. Recuperado el 10 de julio 2021 de [<https://www.mch.cl/2013/04/12/grandes-danos-provoco-deslizamiento-en-mina-kennecott-utah-copper/#>]

Minería Chilena. (23 de enero 2020). Sequía golpea producción de Los Bronces. Recuperado el 8 de junio 2021 de [<https://www.mch.cl/2020/01/23/sequia-golpea-produccion-de-los-bronces/#>]

MMA (2020). 4to Informe Bienal de actualización de Chile sobre el Cambio Climático. Recuperado desde [[https://www4.unfccc.int/sites/SubmissionsStaging/NationalReports/Documents/574160\\_Chile-BUR4-1-Chile\\_4th%20BUR\\_2020.pdf](https://www4.unfccc.int/sites/SubmissionsStaging/NationalReports/Documents/574160_Chile-BUR4-1-Chile_4th%20BUR_2020.pdf)].

MMA. (2017). Plan de Acción Nacional de Cambio Climático 2017-2022. Recuperado el 1 de diciembre de 2021 de [[https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2017/07/plan\\_nacional\\_climatico\\_2017\\_2.pdf](https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2017/07/plan_nacional_climatico_2017_2.pdf)].

Mount Isa Mines Limited. (2001). R67 Mine Refrigeration Plant - Occupational Health and Safety Innovation Awards 2001 Submission (pp. 1–6).

Nelson, J., Schuchard, R. (2011). Adapting to Climate Change: A guide for the mining industry. Recuperado el 15 de noviembre de [[https://www.bsr.org/reports/BSR\\_Climate\\_Adaptation\\_Issue\\_Brief\\_Mining.pdf](https://www.bsr.org/reports/BSR_Climate_Adaptation_Issue_Brief_Mining.pdf)].

Onemi. (7 de junio de 2015). Monitoreo por evento Hidrometeorológico. Recuperado el 1 de junio de 2021 de: [<https://www.onemi.gov.cl/alerta/monitoreo-por-evento-hidrometeorologico/>]

PartnerRe (12 de julio 2011). Multiple mining risks. Recuperado el 8 de julio de 2021 de [[https://partnerre.com/opinions\\_research/multiple-mining-risks/](https://partnerre.com/opinions_research/multiple-mining-risks/)]

Portal Minero (26 de marzo 2015). Minera Candelaria reanuda operaciones tras suspensión por inundaciones. Recuperado el 10 de julio 2021 de [<http://www.portalminero.com/pages/viewpage.action?pageId=96749593>]

Reporte Minero (11 de septiembre 2020). Minero fallece por deslizamiento de tierra al interior de yacimiento. Recuperado el 8 de julio 2021 de [<https://www.reporteminero.cl/noticia/noticias/2020/09/minero-fallece-por-deslizamiento-de-tierra-al-interior-de-yacimiento>]

Robinson, P. J. (2001). On the Definition of a Heat Wave, *Journal of Applied Meteorology*, 40(4), 762-775. Recuperado el 10 de julio, 2021, desde [[https://journals.ametsoc.org/view/journals/apme/40/4/1520-0450\\_2001\\_040\\_0762\\_otdoah\\_2.0.co\\_2.xml](https://journals.ametsoc.org/view/journals/apme/40/4/1520-0450_2001_040_0762_otdoah_2.0.co_2.xml)]

Salamon, Lester (ed.) (2002), *The Tools of Government: A guide to the new governance*, Oxford, Oxford University Press. Recuperado el 1 de diciembre de 2021 de [<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.678.2664&rep=rep1&type=pdf>]

SERNAGEOMIN. (2010). Peligro de remociones en masa. In Geología para la reconstrucción y la gestión del riesgo, 1. Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Registrado IR-10- 43: 12p., 21 mapas diferentes escalas. Santiago.

The Conversation (23 de abril 2013). Mining companies are underprepared for climate change. Recuperado el 10 de julio 2021 de [ <https://theconversation.com/mining-companies-are-underprepared-for-climate-change-13091>]

Urban Land Institute, ULI. (2015). A Guide for Assessing Climate Change Risk. Washington, DC. Recuperado de [ <https://uli.org/wp-content/uploads/ULI-Documents/ULI-A-Guide-for-Assessing-Climate-Change-Risk-final.pdf> ]

Weather Spark. (Sin fecha). El clima y el tiempo promedio en todo el año en Antofagasta. Recuperado el 24 de septiembre de 2021 desde: [ <https://es.weatherspark.com/y/26546/Clima-promedio-en-Antofagasta-Chile-durante-todo-el-a%C3%B1o> ]

Wieczorek, G. (1996). Landslides types and processes. In Landslides. Investigation and Mitigation (Turner, A.K.; Schuster, R.L.; editors). Transportation Research Board, National Research Council: 76-90. Washington.

# Anexos

## Anexo A: Cadenas de impacto

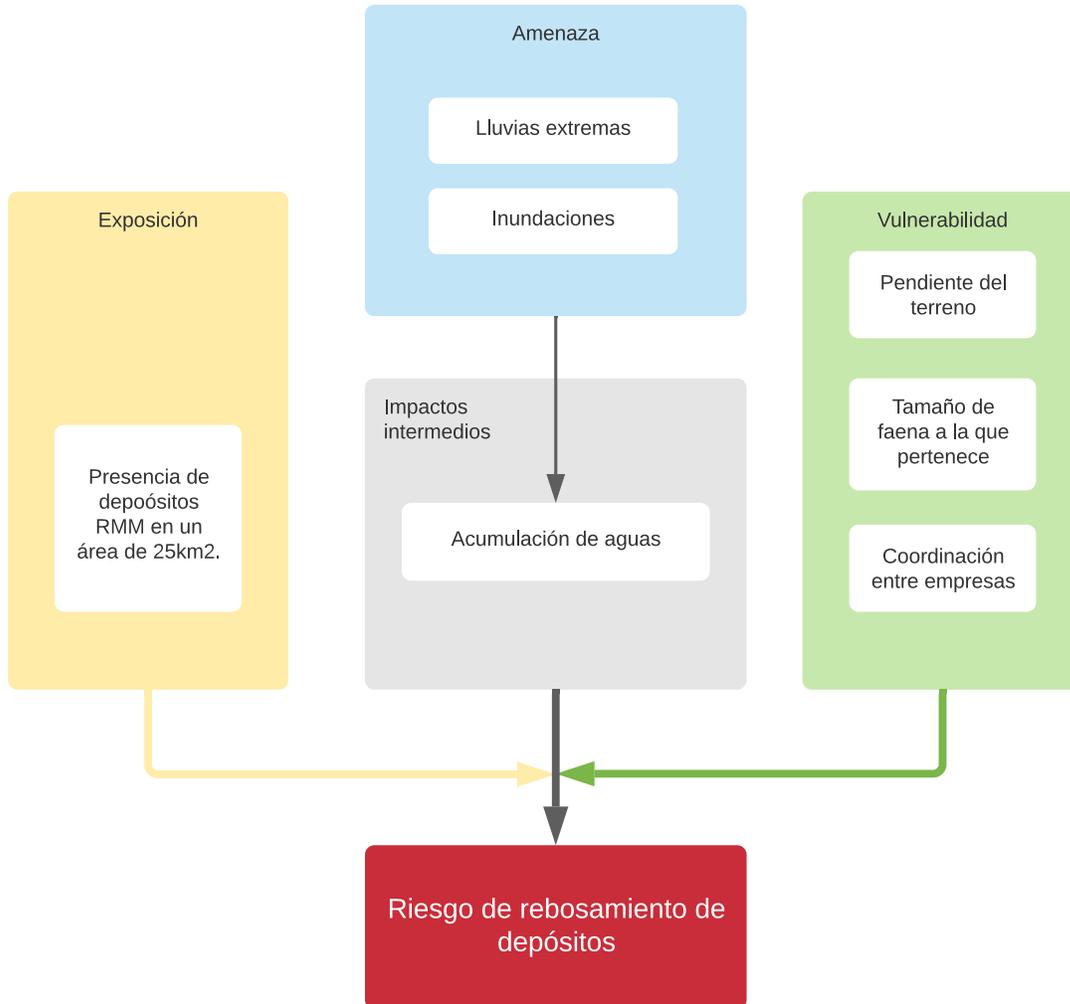


Figura 47: Cadena de impacto: Riesgo de rebosamiento de depósitos. Fuente: Elaboración propia.

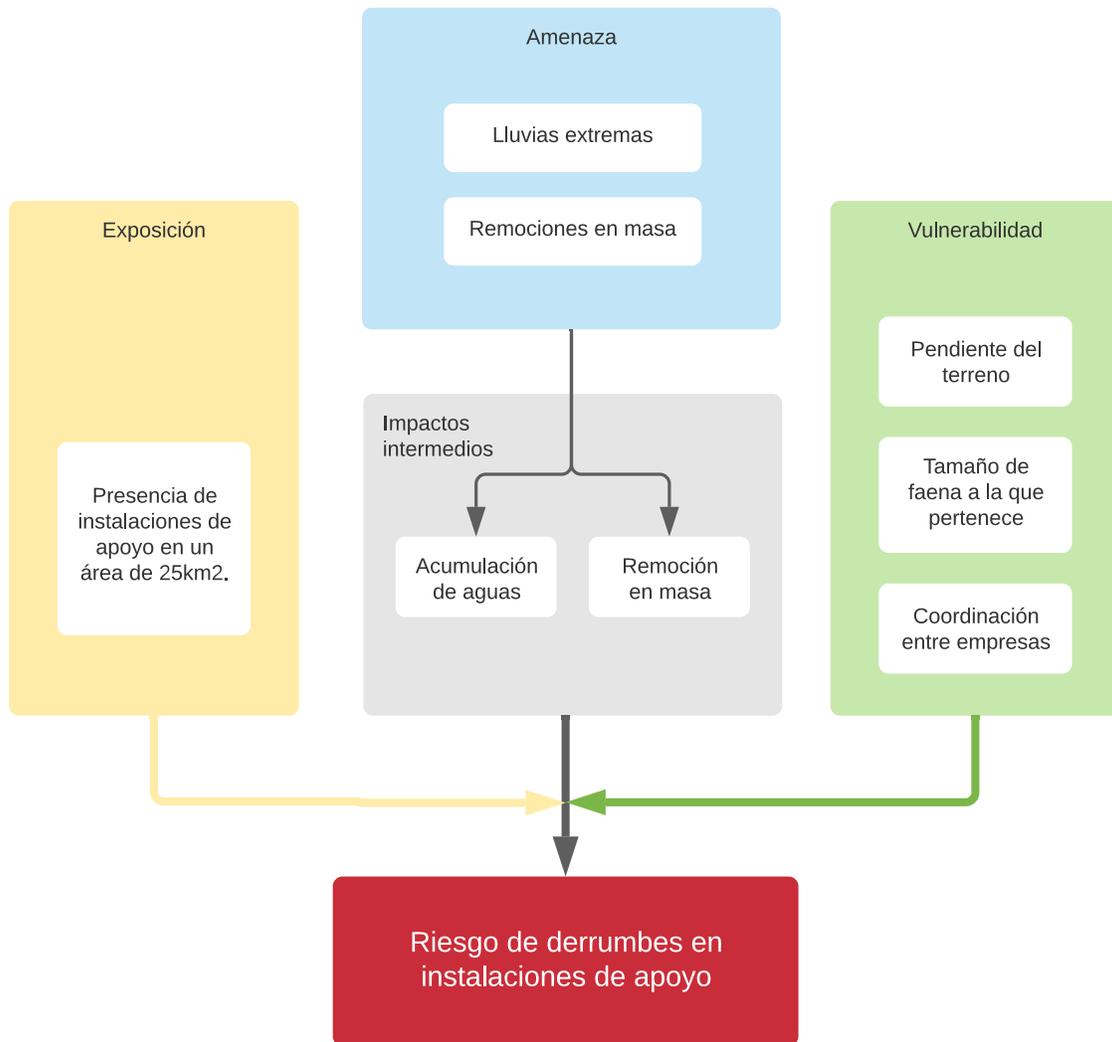


Figura 48: Cadena de impacto: Riesgo de derrumbes en instalaciones de apoyo. Fuente: Elaboración propia.

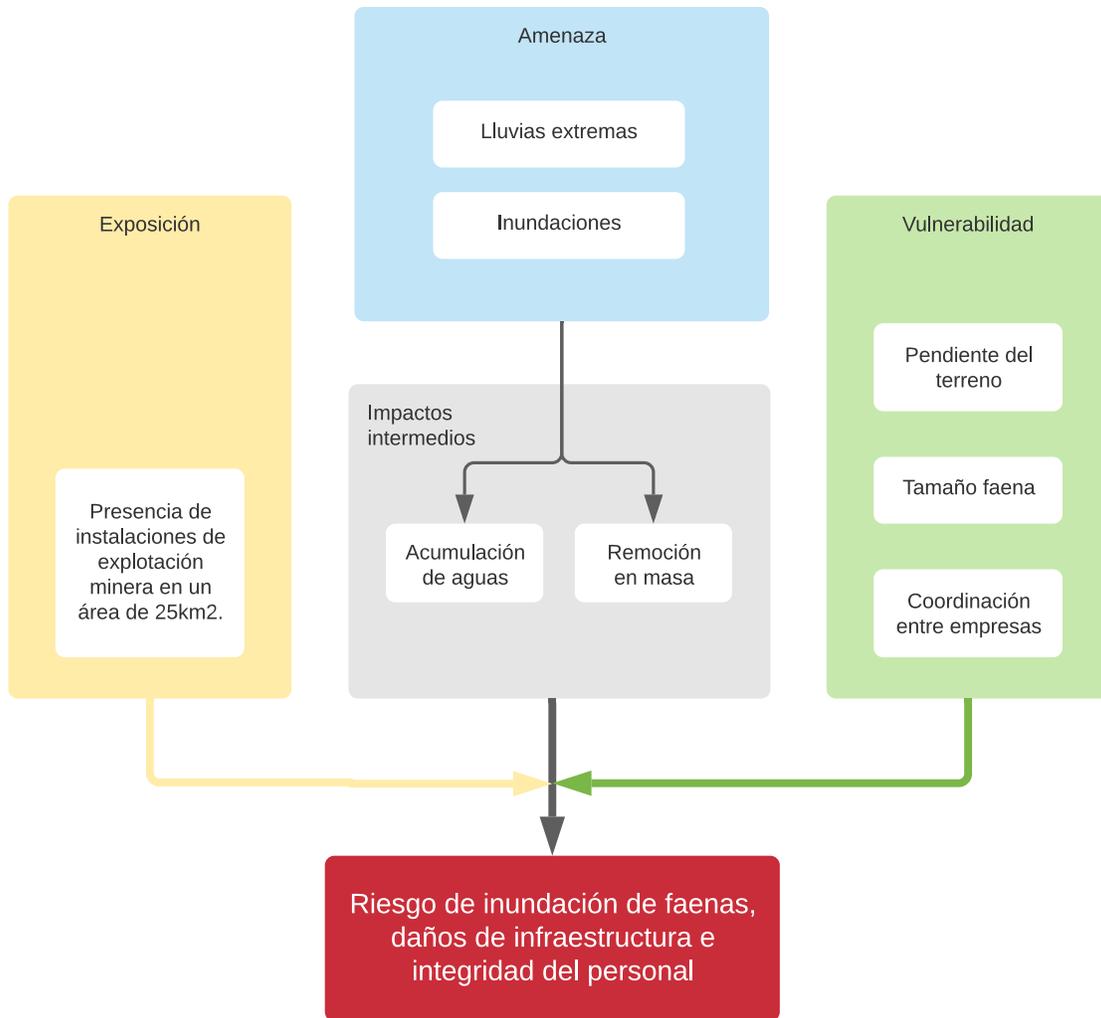


Figura 49: Cadena de impacto: Riesgo de inundación de faenas, daños de infraestructura e integridad del personal. Fuente: Elaboración propia.

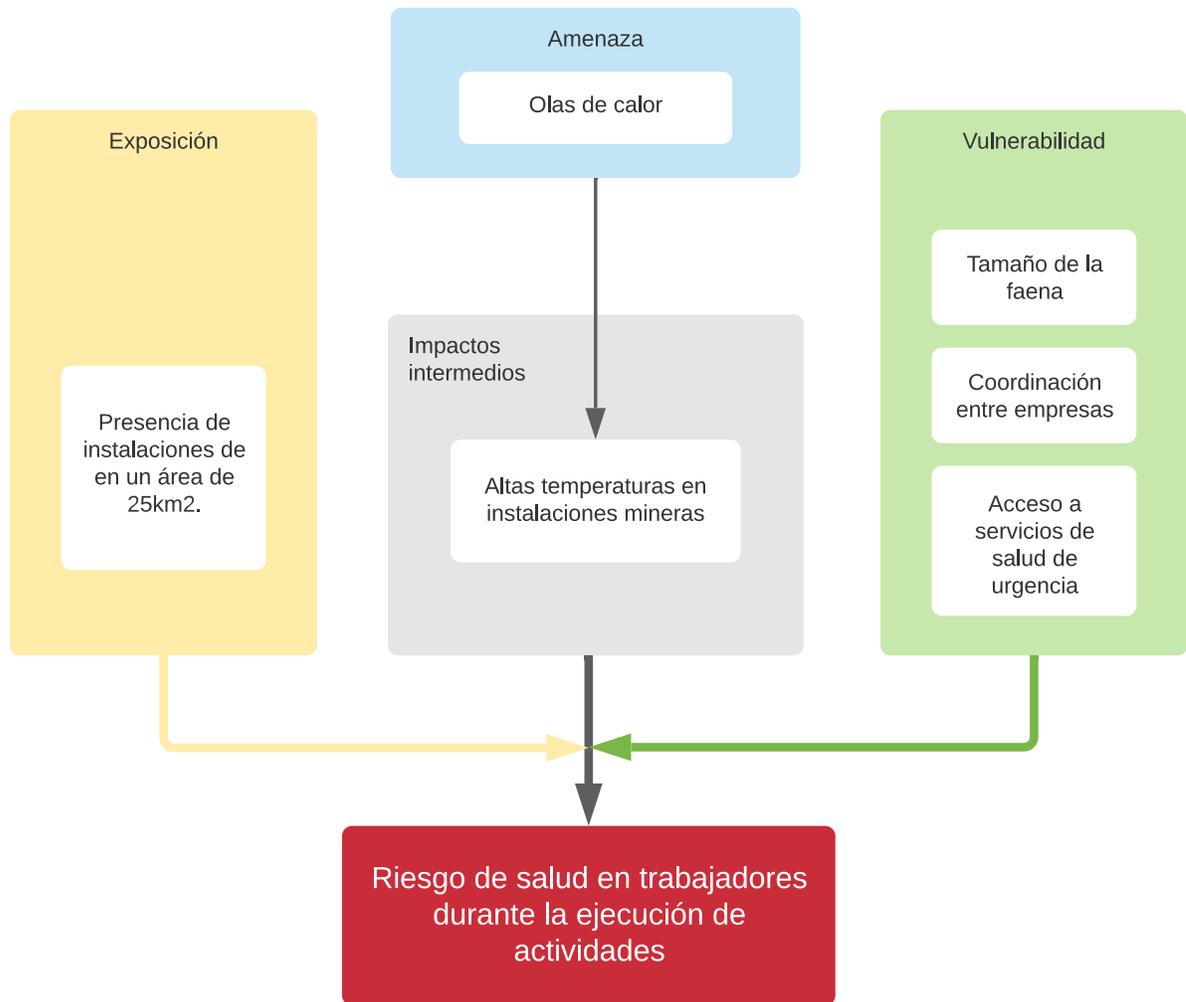


Figura 50: Cadena de impacto: Riesgo de salud en trabajadores durante la ejecución de actividades. Fuente: Elaboración propia.

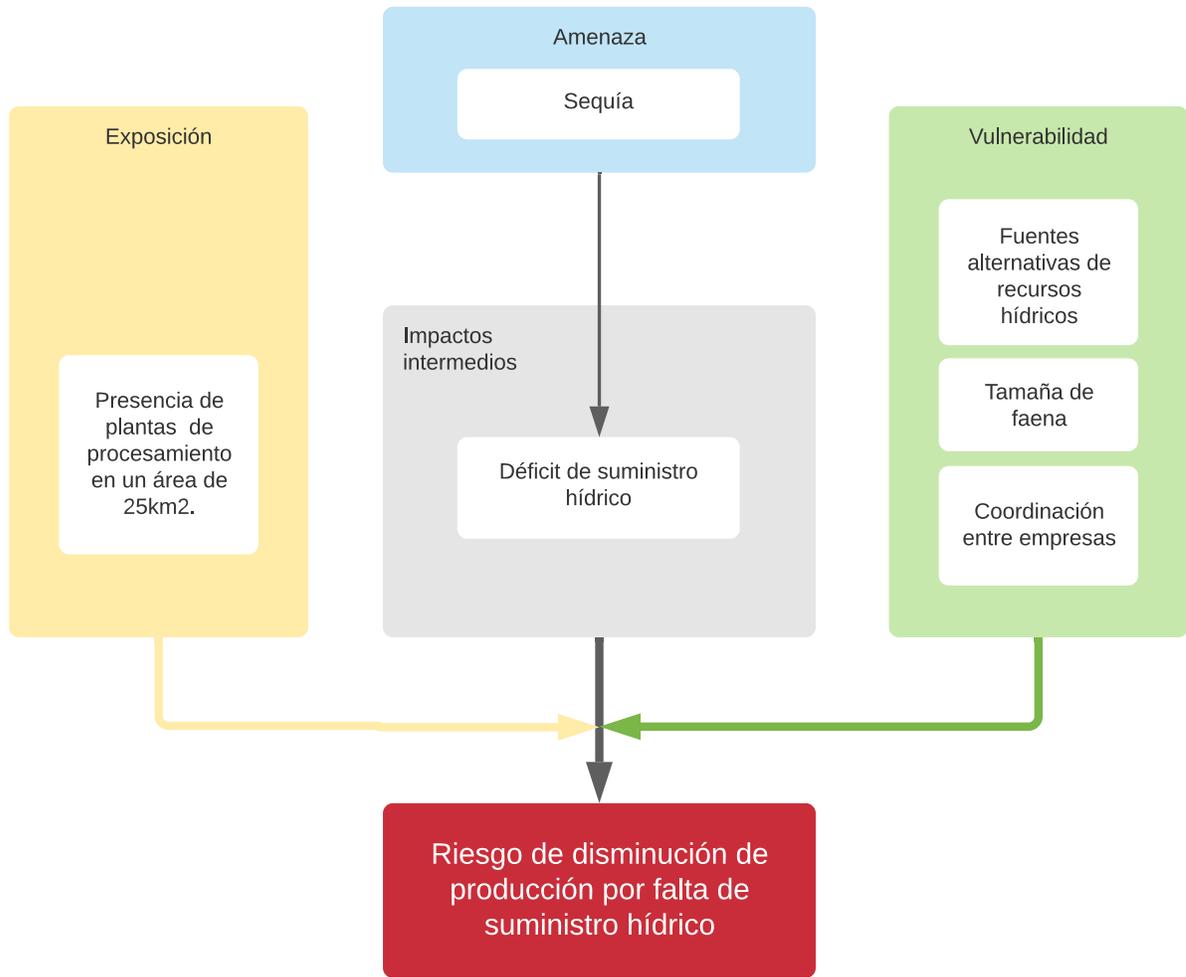


Figura 51: Cadena de impacto: Riesgo de disminución de producción por falta de suministro hídrico. Fuente: Elaboración propia.

## **Anexo B: Elaboración de planes de Adaptación sectoriales**

Lo que se expone a continuación, viene directamente extraído del Plan de Acción Nacional de Cambio Climático II elaborado por el Ministerio del Medio Ambiente.

Los pasos que se han definido, para la elaboración de los planes sectoriales corresponden a una secuencia lógica según las recomendaciones de la CMNUCC, involucrando gradualmente diferentes niveles de actores y garantizando así una participación amplia, en la elaboración de los planes y un grado de consenso necesario para su futura implementación. Estos son:

1. Conformar equipos técnicos interinstitucionales, los que deberán ser debidamente capacitados en los temas relevantes de adaptación al cambio climático y referente a los impactos de este fenómeno en su respectivo sector.
2. Identificar los actores relevantes interesados en el plan, tanto de las organizaciones ciudadanas como del sector privado, de manera de recoger sus visiones e incorporarlas en la discusión de los equipos técnicos.
3. Analizar los escenarios climáticos y sus posibles impactos, sobre los componentes vulnerables del respectivo sector, incluyendo el análisis y manejo de riesgo ante eventos climáticos extremos.
4. Identificar medidas de adaptación al cambio climático en forma participativa para el respectivo sector. Las medidas identificadas deben orientarse a:
  - i. Las recomendaciones de la OCDE.
  - ii. Los lineamientos estratégicos de las respectivas instituciones y/o Ministerios.
  - iii. La compatibilidad entre medidas de mitigación del cambio climático y medidas de adaptación buscando, si es posible, sinergias entre ambas.
  - iv. Asegurar coherencia entre las medidas de adaptación de los diferentes sectores, para evitar conflictos y buscar sinergias.
5. Elaborar un anteproyecto de Plan de Adaptación Sectorial, identificando medidas prioritarias según las necesidades, urgencias y posibilidades concretas a nivel regional y local, con énfasis en los actores sociales y/o ecosistemas más vulnerables al cambio climático. Deberá considerarse también el manejo de riesgos frente a desastres climáticos.
6. Realizar una consulta ciudadana del anteproyecto del Plan de Adaptación Sectorial, con el objetivo de dar a conocer públicamente el plan de adaptación sectorial respectivo, y recoger recomendaciones y sugerencias por parte de la ciudadanía interesada.
7. Elaborar la versión final del Plan de Adaptación Sectorial.

8. Presentar la versión final del Plan al Consejo de Ministros para Sustentabilidad y Cambio Climático para su aprobación.

## Anexo C: Mapas de vulnerabilidad de lluvias extremas

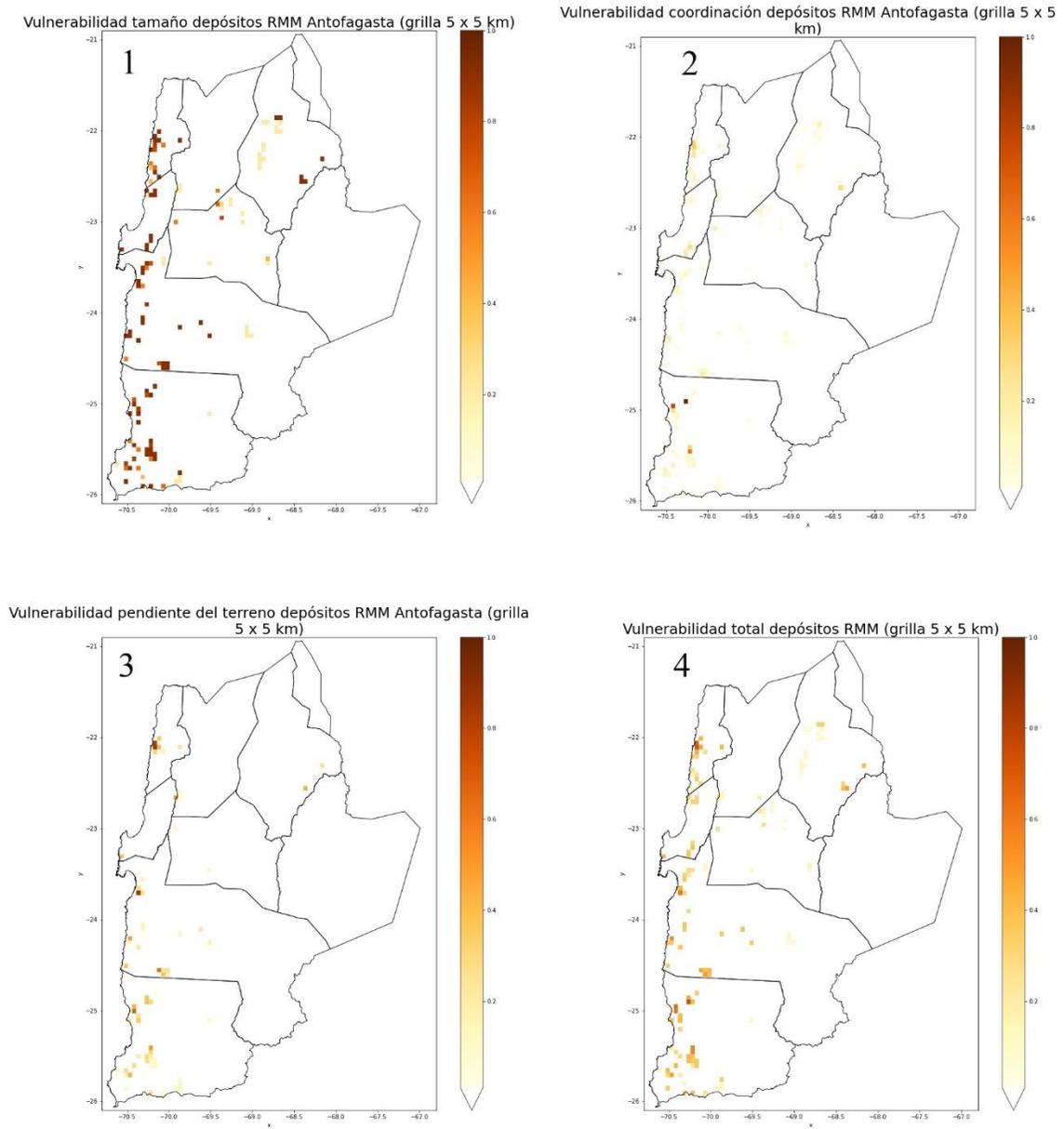
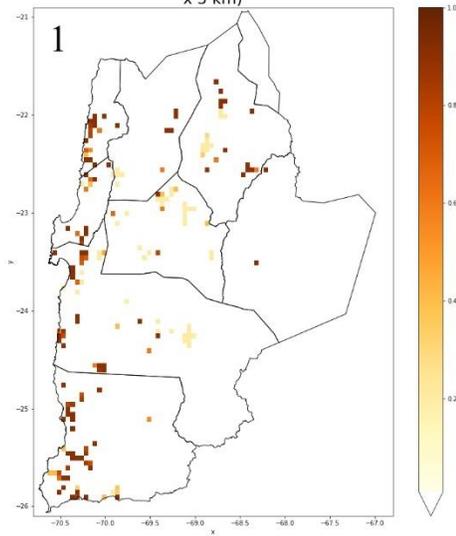
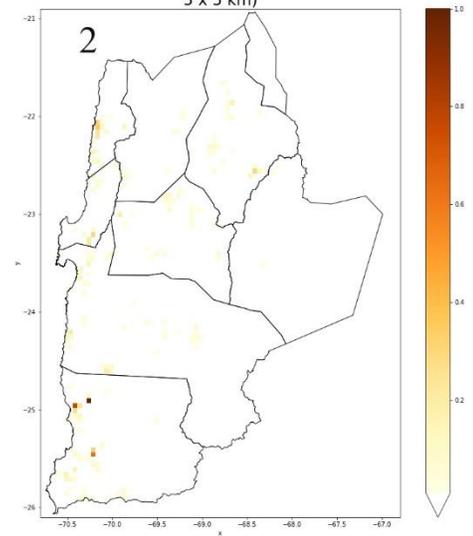


Figura 52: Mapas de vulnerabilidad respecto a lluvias extremas para depósitos RMM. Fuente: Elaboración propia.

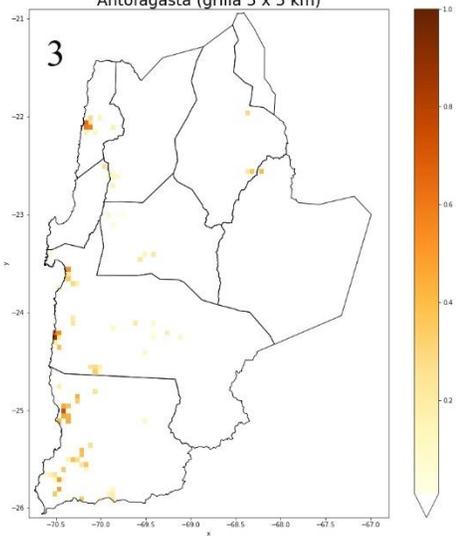
Vulnerabilidad tamaño de instalaciones de apoyo Antofagasta (grilla 5 x 5 km)



Vulnerabilidad coordinación instalaciones de apoyo Antofagasta (grilla 5 x 5 km)



Vulnerabilidad pendiente del terreno instalaciones de apoyo Antofagasta (grilla 5 x 5 km)



Vulnerabilidad total instalaciones de apoyo (grilla 5 x 5 km)

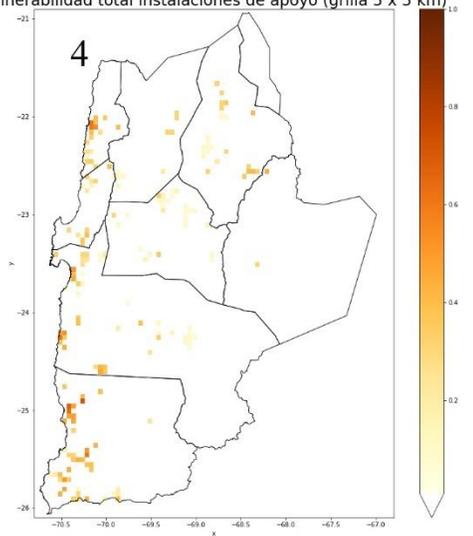


Figura 53: Mapas de vulnerabilidad respecto a lluvias extremas para instalaciones de apoyo. Fuente: Elaboración propia.

