

**REPÚBLICA DE CHILE
SERVICIO DE EVALUACIÓN AMBIENTAL
DIRECCIÓN EJECUTIVA**

**SE PRONUNCIA SOBRE LA VIGENCIA
Y OBSERVANCIA DEL CRITERIO DE
EVALUACIÓN EN EL SEIA: CAMBIO
CLIMÁTICO EN LA EVALUACIÓN
AMBIENTAL DEL RECURSO HÍDRICO
RESOLUCIÓN EXENTA**

SANTIAGO, 10 DE NOVIEMBRE DE 2023

VISTOS:

Lo dispuesto en la Ley N°19.300, sobre Bases Generales del Medio Ambiente (en adelante, “Ley N°19.300”); en el Decreto Supremo N°40, de 2012, del Ministerio del Medio Ambiente, que establece el Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (en adelante, “Reglamento del SEIA”); en el Decreto con Fuerza de Ley N°1/19.653, que Fija el Texto Refundido, Coordinado y Sistematizado de la Ley N°18.575, Orgánica Constitucional de Bases Generales de la Administración del Estado; en la Ley N°19.880, sobre Bases de los Procedimientos Administrativos que rigen los Actos de los Órganos de la Administración del Estado; en el Decreto N°40, de fecha 06 de abril de 2022, del Ministerio del Medio Ambiente, que nombra Directora Ejecutiva del Servicio de Evaluación Ambiental; y en la Resolución N°07 del 26 de marzo del año 2019 de la Contraloría General de la República, que Fija Normas sobre Exención del Trámite de Toma de Razón.

CONSIDERANDO:

1. Que, la letra d) del artículo 81 de la Ley N°19.300 establece que corresponderá al Servicio de Evaluación Ambiental “*uniformar los criterios, requisitos, condiciones, antecedentes, certificados, trámites, exigencias técnicas y procedimientos de carácter ambiental que establezcan los ministerios y demás organismos del Estado competentes, mediante el establecimiento, entre otros, de guías trámite*”.
2. Que, el inciso 2° del artículo 4° del Reglamento del SEIA, dispone que el “*Servicio podrá, de conformidad a lo señalado en el artículo 81 letra d) de la Ley, uniformar los criterios o exigencias técnicas asociadas a los efectos, características o circunstancias contempladas en el artículo 11 de la Ley, los que deberán ser observados para los efectos del presente Título*” (Título II del Reglamento del SEIA).
3. Que la “Guía metodológica para la consideración del cambio climático en el SEIA” publicada y vigente desde el 13 de enero de 2023 por Resolución Exenta N°20239910135 hace mención de la necesaria predicción de impactos sobre el recurso hídrico acorde con la condición más desfavorable producto de cambio climático.



4. Que, en el ejercicio de las facultades precedentemente señaladas, el Servicio elaboró el documento “**Criterio de evaluación en el SEIA: Cambio climático en la evaluación ambiental del recurso hídrico**”.

Este documento tiene por objetivo entregar una metodología para proyectar los cambios de precipitación y temperatura producto del cambio climático, estableciendo para ello una zonificación de Chile y los porcentajes de cambio de precipitación para cada zona. A su vez se establece un valor fijo para todo Chile en materia de aumento de temperatura. Con ello se espera simplificar y aunar los valores de proyecciones que posteriormente son usados en la predicción de impactos sobre el recurso hídrico.

RESUELVO:

1. **Tener presente** que el documento singularizado en el Considerando N°4 de la presente resolución se encuentra vigente, debiendo observarse su contenido de acuerdo con lo establecido en la letra d) del artículo 81 de la Ley N°19.300 y en el Decreto Supremo N°40, de 2012, Reglamento del SEIA, del Ministerio del Medio Ambiente.
2. **Actualizar** la “Guía metodológica para la consideración del cambio climático en el SEIA” a la vista de lo dispuesto en el documento “Criterio de evaluación en el SEIA: Cambio climático en la evaluación ambiental del recurso hídrico”, generando con ello una segunda edición de dicha guía.

ANÓTESE, COMUNÍQUESE, PUBLÍQUESE Y ARCHÍVESE

**VALENTINA DURÁN MEDINA
DIRECTORA EJECUTIVA
SERVICIO DE EVALUACIÓN AMBIENTAL**

JCMF/BMA/MCM/CCH/MGL/ozr

Distribución:

- Direcciones Regionales, Servicio de Evaluación Ambiental
- División Jurídica, Servicio de Evaluación Ambiental.
- División de Evaluación y Participación Ciudadana, Servicio de Evaluación Ambiental.
- Coordinación Regional, Servicio de Evaluación Ambiental.
- División de Tecnologías y Gestión de la Información, Servicio de Evaluación Ambiental.
- Departamento de Auditoría Interna, Servicio de Evaluación Ambiental.
- Departamento de Comunicaciones, Servicio de Evaluación Ambiental.

c.c:

- Dirección Ejecutiva, Servicio de Evaluación Ambiental.
- Of. Partes, Servicio de Evaluación Ambiental



Firmado por: Juan
Cristóbal Moscoso
Farias
Fecha: 10/11/2023
16:33:14 CLST



Firmado por: Valentina
Alejandra Durán
Medina
Fecha: 10/11/2023
16:58:42 CLST

CRITERIO DE EVALUACIÓN EN EL SEIA:

Cambio climático en la evaluación ambiental del recurso hídrico

CRITERIO DE EVALUACIÓN EN EL SEIA: CAMBIO CLIMÁTICO EN LA EVALUACIÓN AMBIENTAL DEL RECURSO HÍDRICO

Autor: Servicio de Evaluación Ambiental

Primera Edición

Santiago, noviembre 2023

Diseño y diagramación: Servicio de Evaluación Ambiental

Fotografía de portada: Adobe Stock

Fotografías interior: Adobe Stock, Deposiphotos

Como citar este documento: Servicio de Evaluación Ambiental, 2023. Criterio de evaluación en el SEIA: Cambio climático en la evaluación ambiental del recurso hídrico. Primera edición.

Si desea presentar alguna consulta, comentario o sugerencia respecto del documento, por favor, escribir al siguiente correo comentarios.documentos@sea.gob.cl

ÍNDICE

PRESENTACIÓN	5
RESUMEN	7
1. INTRODUCCIÓN	8
2. MARCO CONCEPTUAL	10
2.1 Escenarios de emisión (RCP)	11
2.2 Modelos climáticos globales (GCM)	13
2.3 Proyecciones de cambio climático	14
3. PROYECCIONES CLIMÁTICAS EN CHILE	16
3.1 Atlas de Riesgo Climático (ARClím)	16
3.1.1 Precipitación y temperatura proyectada	19
3.2 Balance Hídrico Nacional	22
4. VARIACIONES DE PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA EN EL SEIA	25
4.1 Ejemplo de aplicación	29
5. APLICABILIDAD DEL CRITERIO METODOLÓGICO	32
6. BIBLIOGRAFÍA	33
1. ANEXO A. Metodología de agrupación	35
2. ANEXO B. Alternativas para obtención de variables hidrometeorológicas bajo escenarios de CC	37
2.1 Proyecciones propias	37
2.2 Balance Hídrico Nacional	39



PRESENTACIÓN

En un contexto de crisis ambiental, nos enfrentamos al aumento de la contaminación, la pérdida de biodiversidad y el cambio climático (CC). Con esta realidad, Chile ha tomado decisiones siendo uno de los 193 Estados miembro que firmó, en septiembre de 2015, la Agenda 2030 para el Desarrollo Universal, cuyo objetivo 13 Acción por el Clima, indica la necesidad de adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos.

Avanzando en estas materias, el 13 de junio de 2022 se publica la Ley N°21.455 Marco de Cambio Climático, estableciendo la institucionalidad, instrumentos de gestión y mecanismos de financiamiento para que el país enfrente el CC en materia de mitigación y adaptación y, de esta manera, cumplir con los compromisos internacionales asumidos en 2015 en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (COP 21), más conocido como el Acuerdo de París. Adicionalmente, la Ley establece una meta nacional que propone alcanzar la carbono neutralidad a más tardar el 2050 y adaptarse al CC, reduciendo la vulnerabilidad y aumentando la resiliencia a los efectos adversos del CC. Para ello formaliza la institucionalidad existente y consagra responsabilidades y obligaciones a 13 ministerios, regiones y comunas, así como un número importante de instrumentos de gestión. En este sentido, la Ley mandata la consideración del CC en los componentes del medio ambiente que resulten pertinentes en el marco del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA).

Por otro lado, la actual administración de la Dirección Ejecutiva del Servicio de Evaluación Ambiental (SEA), desde abril de 2022, estableció tres ejes principales de gestión:

1. Asegurar una evaluación y gestión técnica de excelencia, apegada a la normativa con unificación de criterios.
2. Implementación progresiva del Acuerdo de Escazú en el SEIA.
3. Incorporación del cambio climático en la evaluación de impacto ambiental.

En esta línea, el SEA publica la *Guía metodológica para la consideración del cambio climático en el SEIA* (SEA, 2023b), la cual establece un marco metodológico general para la incorporación del cambio climático en la evaluación ambiental, tanto de las Declaraciones de Impacto Ambiental (DIA), como también en los Estudios de Impacto Ambiental (EIA). Esta nueva exigencia viene de la mano del desafío de desarrollar metodologías específicas por componente ambiental para la consideración del cambio climático.

El presente documento busca fortalecer la incorporación del CC en la predicción de impactos sobre el recurso hídrico; por lo tanto, está dirigido a los especialistas que efectivamente realizan esta predicción y a evaluadores del SEA y de los otros Órganos de la Administración del Estado con Competencia Ambiental (Oaeca) que deben revisar sus resultados. De este modo, se entregan indicaciones sobre el uso de la información de proyecciones hidrometeorológicas actualmente disponibles, y criterios de aplicabilidad dentro del SEIA.

La necesidad de publicar este documento viene de un diagnóstico realizado sobre la forma en que los proyectos han incorporado el CC en la evaluación ambiental del recurso hídrico. Se observa que a la fecha se utiliza una gran variedad de fuentes de información, aplicando diferentes criterios para realizar proyecciones de precipitación y temperatura, generando un uso dispar de las proyecciones obtenidas. De este modo, el SEA, al estandarizar la forma de hacer uso de la información disponible, da certeza técnica a la evaluación ambiental y beneficia tanto a titulares de proyectos como a consultores al optimizar los esfuerzos y recursos que disponen para la elaboración de DIA y EIA.

Se hace presente que este documento materializa la atribución del SEA expresada en el artículo 81, letra d), de la Ley N°19.300, Sobre Bases Generales del Medio Ambiente, en torno a uniformar criterios, requisitos, condiciones, antecedentes, certificados, trámites, exigencias técnicas, y procedimientos de carácter ambiental que establezcan los ministerios y demás organismos del Estado competentes, en particular respecto al procedimiento de evaluación ambiental, a través de guías y otros instrumentos¹.

Para la elaboración de este documento se tuvo presente el resultado de la “Consultoría para la Incorporación del Cambio Climático en la Evaluación Ambiental del Recurso Hídrico”, realizada por la empresa Hídrica Consultores SpA, así como también participaron profesionales de la Dirección General de Aguas (DGA) del Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos y de la División de Estudios y Planificación, y profesionales del Ministerio del Medio Ambiente (MMA).

¹ Tener en consideración el instructivo que Imparte instrucciones sobre la aplicabilidad de las guías y criterios de evaluación publicados por la Dirección Ejecutiva del Servicio de Evaluación Ambiental, Of. N°202399102593, disponible en el [link](https://sea.gob.cl/sites/default/files/imce/archivos/2023/07/24/Instructivo%20SEA%20aplicabilidad%20gu%C3%ADas%20y%20criterios%202023.pdf) <https://sea.gob.cl/sites/default/files/imce/archivos/2023/07/24/Instructivo%20SEA%20aplicabilidad%20gu%C3%ADas%20y%20criterios%202023.pdf>

RESUMEN

El objetivo del presente documento es entregar una metodología para el cálculo de la variación en precipitación y temperatura en Chile, valores que posteriormente deben ser usados para la predicción de impactos sobre el componente hídrico en aquellos casos donde se identifiquen sinergias negativas entre un proyecto y el CC.

Para una mayor comprensión y justificación técnica de la metodología, el capítulo 2 presenta el marco conceptual detrás de las proyecciones de variables hidrometeorológicas bajo escenarios de CC. Este es clave para tener conocimientos básicos respecto de los escenarios de emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI), los modelos climáticos globales y la ciencia que estudia las proyecciones de CC.

Luego de esta aproximación teórica general, en el capítulo 3 se presentan las proyecciones actualmente disponibles de las variaciones futuras de precipitación y temperatura para Chile. En este sentido, se hace referencia a las dos principales fuentes de información oficial: el Atlas de Riesgos Climáticos (ARClím), elaborado por el MMA, y el Balance Hídrico Nacional (BHN), elaborado por la DGA.

Con ello, el documento, en su capítulo 4, procede a explicar la metodología que han de aplicar titulares y consultores, y que será revisada por los evaluadores SEA y Oaeca competentes, culminando con ejemplos que faciliten su comprensión.

Finalmente, se presentan anexos que entregan más detalles respecto de la construcción de la metodología, y ofrecen una vía para la elaboración de proyecciones propias por parte de titulares, cuando esto fuere necesario.



1. INTRODUCCIÓN

La *Guía metodológica para la consideración del cambio climático en el SEIA* (SEA, 2023b) entrega las directrices generales para la incorporación del Cambio Climático (CC) en la evaluación ambiental de Declaraciones de Impacto Ambiental (DIA) y Estudios de Impacto Ambiental (EIA), según lo estableció la Ley N°21.455 Marco de Cambio Climático, la cual mandata la consideración de la variable de CC en los componentes del medio ambiente que resulten pertinentes en el marco del SEIA.

En el caso del recurso hídrico, es el más directamente afectado por el clima, siendo prioritario abordarlo en el SEIA. Para ello la guía metodológica recomienda realizar la predicción de impactos e identificación de su significancia utilizando las proyecciones del clima futuro bajo el escenario RCP 8.5 de altas emisiones de gases efecto invernadero (GEI). Por esto se sugiere el uso de las variables hidrometeorológicas disponibles en el explorador de amenazas de la plataforma ARClím, desarrollado por el MMA. Sin embargo, la guía no entrega una metodología de cómo utilizar esta información.

Por lo anterior, mediante licitación pública, el SEA adjudicó a Hídrica Consultores SpA el desarrollo de la asesoría “Consultoría para la Incorporación del Cambio Climático en la Evaluación Ambiental del Recurso Hídrico”, la cual tuvo por objetivo analizar la información disponible en ARClím y elaborar metodologías para incorporar el CC en la predicción de impactos sobre el recurso hídrico. Algunos de los resultados de esta consultoría sirvieron como insumo para la elaboración de este documento.

Cabe destacar que este documento consiste en un primer esfuerzo por trabajar directamente con los datos de proyecciones de CC vinculados a impactos sobre el componente hídrico. En este sentido, la intención no es entregar metodologías para incorporar sus resultados en cada uno de los problemas asociados a la evaluación ambiental de recursos hídricos, sino más bien

exponer las proyecciones actualmente disponibles, sus diferentes grados de incertidumbre y desde ahí proponer una metodología para hacer uso de esta información.

En consideración a que los efectos del CC generan alteraciones en múltiples variables hidrometeorológicas, lo relevante es tener en cuenta que las más determinantes para el desarrollo de estudios relacionados con los recursos hídricos son la precipitación y la temperatura. Por este motivo, el criterio técnico que se presenta en este documento está enfocado en el uso y determinación de proyecciones de CC para estas dos variables.

De este modo, se da certeza a los actores que participan de la evaluación ambiental, al indicar cuáles son las variaciones de precipitación y temperatura que se deben utilizar en el marco del SEIA, con lo cual se facilita el proceso de elaboración, revisión y evaluación de DIA y EIA.

.....

El objetivo del presente documento es entregar un criterio para determinar variaciones de precipitación y temperatura por efecto del CC. Cabe destacar que **está fuera del alcance de este documento el entregar metodologías específicas para estimar las variables del ciclo hidrológico a partir de los cambios de precipitación y temperatura.** Por lo tanto, las metodologías o supuestos que propongan los titulares deberán estar debidamente descritos y justificados.

.....



2. MARCO CONCEPTUAL

La variabilidad climática ocurre de forma natural dentro del sistema climático, debido a procesos de interacción física “internos”, como el intercambio de calor a través y entre la atmósfera y el océano. Una segunda fuente de variabilidad climática proviene de factores “externos” al sistema climático, los cuales tienen la capacidad de alterar el balance radiativo² de la tierra y la atmósfera. Entre ellos se encuentran la actividad volcánica, actividades antropogénicas, cambios en la radiación proveniente del sol o cambios en la órbita terrestre. Algunos de estos factores externos pueden ser considerados parte de la variabilidad climática natural, como el ciclo solar o la actividad volcánica.

En este contexto, el CC hace referencia a una **variación de largo plazo estadísticamente significativa en las propiedades del clima**, tanto de sus valores medios como de su variabilidad, y que pueden ser atribuibles a procesos internos y externos, naturales y antropogénicos³.

Los factores externos también se conocen como **“forzantes”**, y generan un desbalance en la radiación neta de la Tierra, es decir, la diferencia entre la radiación recibida y emitida⁴. Las forzantes negativas tienen el efecto de enfriar el sistema climático, mientras que las forzantes positivas tienen el efecto de calentarlo. En ese sentido, los GEI son una forzante positiva, ya que retienen una parte de la radiación emitida por la Tierra al mismo tiempo que aumentan la absorción de la radiación solar. Algunos ejemplos de los GEI más relevantes son el metano

² Energía que la Tierra recibe del Sol en comparación con la energía que la Tierra libera al espacio.

³ La Ley Marco de Cambio Climático define el CC en su art. 3° letra b) como “cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables”.

⁴ La Ley Marco de Cambio Climático define en su art. 3° letra g) a los forzantes climáticos de vida corta como “conjunto de compuestos con efecto climático, siendo gases, aerosoles o partículas, incluyendo carbono negro, cuya vida media en la atmósfera, después de ser emitidos o formados, se estima en horas o hasta décadas, en un rango siempre inferior a la vida media del dióxido de carbono”.

(CH₄), el óxido nitroso (N₂O) y los halocarburos, siendo el de mayor influencia el dióxido de carbono (CO₂), en términos de que aumenta positivamente el desbalance radiativo de la Tierra (CSIRO and Bureau of Meteorology 2015).

La comunidad científica, reunida en el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático⁵ (IPCC), en sus Informes de Evaluación (*Assessment Report*, AR) utiliza posibles escenarios futuros representativos de concentración (*Representative Concentration Pathways*, RCP), que describen la evolución temporal de los GEI. Luego, mediante modelos de circulación general atmosférica (*global climate models*, GCM), es posible modelar y predecir el comportamiento de ciertas variables atmosféricas de interés para diferentes escenarios futuros de emisión de GEI.

Para una mejor comprensión de estas materias, el capítulo 2 aclara conceptos y metodologías que construyen la base científica para comprender el criterio técnico que establece el documento en el capítulo 4. Se revisa qué son los escenarios de emisión y los modelos climáticos globales (GCM), para con ello explicar cómo estos contribuyen a la estimación de proyecciones climáticas. Luego, en el capítulo 3 se revisa la materialización de estas proyecciones en territorio chileno, dando cuenta de las dos herramientas oficiales que permiten obtener información respecto de las variables de precipitación y temperaturas, estas son el Atlas de Riesgos Climáticos (ARClím) y el Balance Hídrico Nacional (BHN).

2.1 Escenarios de emisión (RCP)

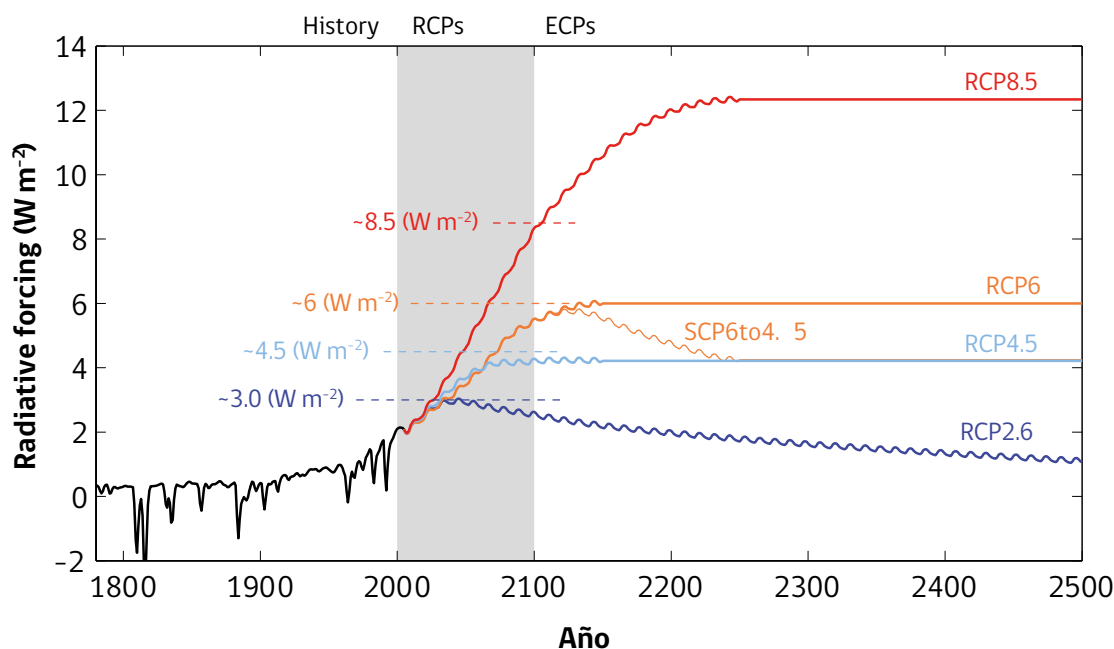
Las emisiones futuras de GEI de fuentes antropogénicas son altamente inciertas, ya que se ven influenciadas por incógnitas tales como el crecimiento económico y demográfico, el desarrollo y transferencias tecnológicas, y cambios políticos y sociales.

Debido a lo anterior, en el Quinto Informe de Evaluación (ARS, 2014), el IPCC seleccionó cuatro escenarios de emisión (Figura 1), los cuales ofrecen conjuntos de datos de resolución espacial del cambio de uso del suelo y de emisiones sectoriales de contaminantes atmosféricos, especificando cuáles serán las concentraciones de GEI y las emisiones antropogénicas anuales hasta el 2100. Estos escenarios de RCP se basan en una combinación de modelos de evaluación integrados, modelos climáticos, modelos de la química atmosférica y modelos del ciclo global del carbono (IPCC, 2013).

Los RCP se nombran en función de la magnitud de la forzante radiativa que ejercen. En este sentido, el RCP8.5 es el escenario que proyecta una forzante radiativa de 8.5 W/m² al 2100, donde se asume una baja reducción en las emisiones de CO₂. Por su parte, el RCP2.6 corresponde a un escenario ambicioso respecto de la reducción de emisiones, alcanzando una emisión máxima cercana al 2020 y luego bajando rápidamente.

5 <https://www.ipcc.ch/languages-2/spanish/>

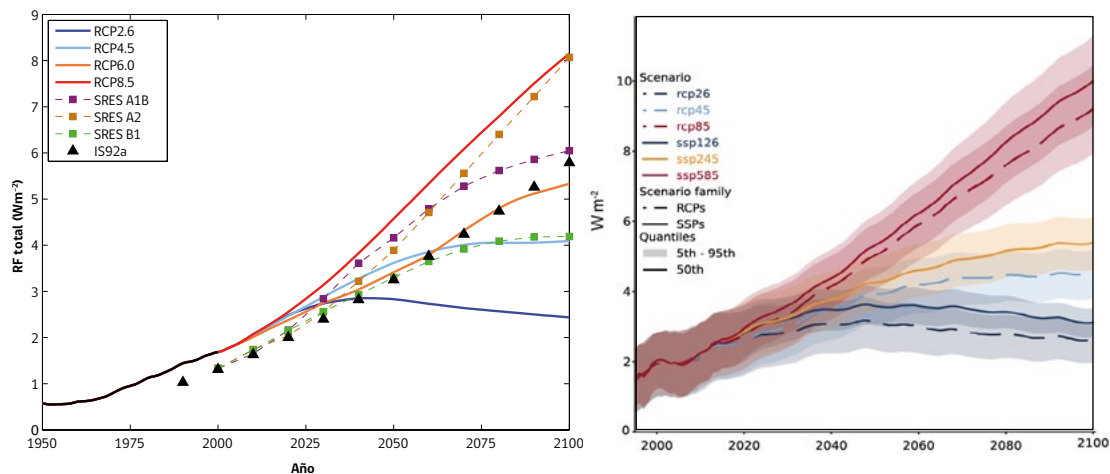
Figura 1. Escenarios de emisión Quinto Informe de Evaluación (AR5, 2014) del IPCC



Fuente: Cubasch et al., 2013. ECPs: escenarios extendidos.

Cabe destacar que, en sus diferentes Informes de Evaluación, el IPCC ha actualizado y cambiado la nomenclatura de los escenarios de emisión (Figura 2). Es así como en el Cuarto Informe de Evaluación (2007) se utilizaron los *Special Report on Emissions Scenarios* (SRES), mientras que en la sexta y última versión del Informe de Evaluación (AR6, 2023) se utiliza el término *Shared Socio-economic Pathways* (SSP) y la nomenclatura utilizada fue SSPx-y, donde "x" es el escenario socioeconómico e "y" es el valor del forzante radiativo aproximado al año 2100.

Figura 2. Comparación escenarios de emisión



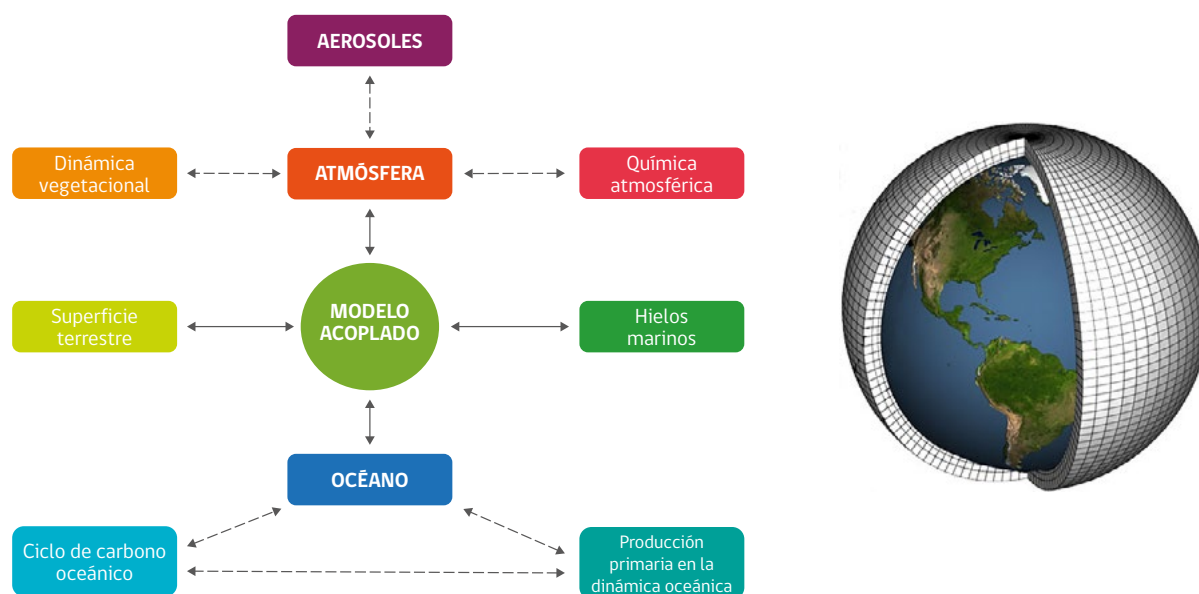
Fuente: izquierda (Cubasch et al., 2013), derecha (IPCC, 2021).

2.2 Modelos climáticos globales (GCM)

La herramienta utilizada para estudiar el clima futuro (para un determinado escenario de emisión) son los Modelos Climáticos Globales (GCM), los que consisten en una **representación matemática del sistema climático** y que se fundamenta en leyes de la física como la conservación de masa, energía y *momentum*.

Los GCM representan a la atmósfera y océanos como grillas tridimensionales de resolución espacial de 100-200 km (Figura 3), lo que les permite simular procesos de gran escala como progresiones de altas y bajas presiones o corrientes oceánicas, entre otros. Gracias a avances tecnológicos, los GCM actualmente son capaces de representar interacciones del ciclo del carbono entre el océano, la atmósfera y el suelo, incluyendo la química atmosférica y la vegetación (Figura 3).

Figura 3. Izquierda, esquema conceptual de modelo climático global (GCM); derecha, esquema grilla tridimensional de resultados de un GCM



Fuente: izquierda, CSIRO and Bureau of Meteorology, 2015. Derecha, NOAA, 2012.

Sin embargo, debido a la gran escala de los GCM y también a las incertidumbres respecto de cómo representar ciertos procesos, aún existen limitaciones para la representación de algunas características regionales o locales relacionadas con la topografía o línea costera, por ejemplo. Lo anterior afecta el grado de certeza en la estimación de las variables meteorológicas, como la precipitación o la temperatura.

En los Reportes de Evaluación del IPCC se utilizan los GCM abordados en el *Coupled Model Intercomparison Project* (CMIP), que a su vez es una iniciativa del *World Climate Research Programme* (WCRP). El objetivo del CMIP es comprender mejor los cambios climáticos pasados, presentes y futuros que surgen de la variabilidad natural no forzada o en respuesta a cambios en el forzamiento radiativo en un contexto de múltiples GCM. Este entendimiento incluye evaluaciones del desempeño de los GCM durante el período histórico y cuantificaciones de las causas del diferencial en relación con proyecciones futuras.

2.3 Proyecciones de cambio climático

La obtención de proyecciones de alguna variable atmosférica en particular, como la temperatura o la precipitación, es el resultado de un proceso que involucra varias etapas (Figura 4), cada una con diferentes grados de dificultad e incertidumbre.

Figura 4. Proceso de estimación de proyecciones de variables climáticas bajo escenarios de cambio climático

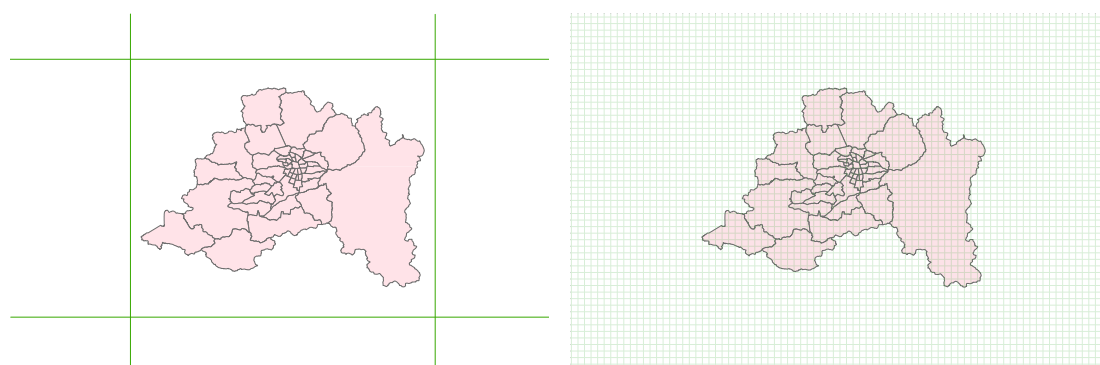


Fuente: elaboración propia.

Como se señaló anteriormente, los escenarios de emisión y GCM son productos que pueden ser obtenidos desde diferentes fuentes. Sin embargo, para obtener **resultados a escala local**, se deben aplicar **técnicas de escalamiento espacial** (*downscaling*), que consisten en metodologías que permiten mejorar la resolución de los resultados, llevándolos desde la escala de cientos de kilómetros a escalas más locales del orden de kilómetros.

A modo de ejemplo, un determinado GCM puede entregar un valor de precipitación promedio para la Región Metropolitana, pero mediante escalamiento es posible estimar diferentes valores de precipitación a nivel comunal o incluso escalas más pequeñas (Figura 5).

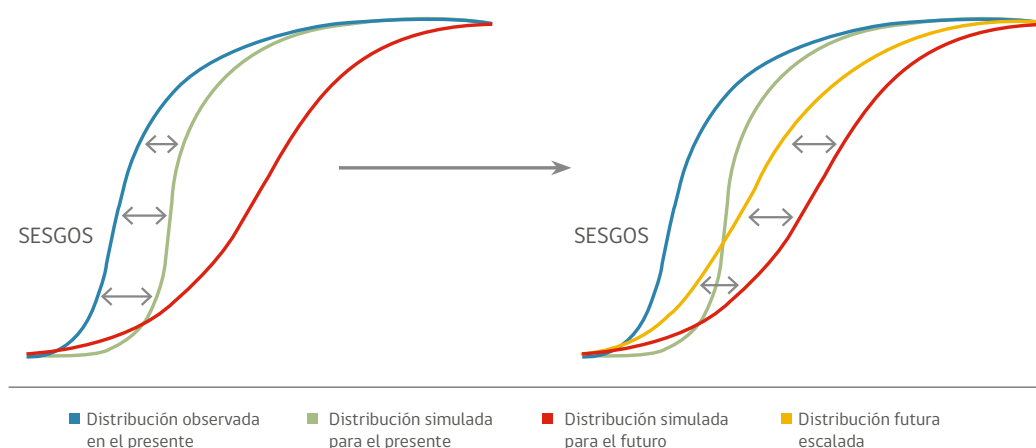
Figura 5. Ejemplo de escalamiento (downscaling) para GCM CSIRO-Mk3-6-0, de grilla horizontal de 210x210 km a grilla de 5x5 km



Fuente: elaboración propia.

Luego de realizado el escalamiento, se requiere ajustar las proyecciones de los GCM a los datos históricos observados, proceso conocido como **corrección de sesgo**. Lo que se busca es detectar inconsistencias entre los datos proyectados por el GCM y los datos históricos, para luego corregir las proyecciones históricas y futuras eliminando los sesgos identificados con respecto a los datos históricos.

Figura 6. Corrección de sesgo



Fuente: Pica-Téllez et al., 2020.

Finalmente, dependiendo de los escenarios y GCM considerados en el análisis, se podría contar con decenas o incluso cientos de resultados para una misma variable climática. En esta etapa es relevante el criterio experto del profesional para seleccionar el resultado de la proyección, que podría considerar criterios como el escenario más representativo de la trayectoria actual (RCP, SSP u otro), el GCM más representativo de la dinámica atmosférica regional, el peor o mejor escenario y el GCM de acuerdo con los objetivos del estudio en particular, criterios estadísticos como el promedio o el uso de percentiles, entre otros.



3. PROYECCIONES CLIMÁTICAS EN CHILE

En Chile existen diferentes fuentes de información de proyecciones climáticas bajo escenarios de cambio climático. Entre ellas se encuentran los Planes Estratégicos de Gestión Hídrica y el Balance Hídrico Nacional (BHN), ambos de la DGA, como también ARClím del MMA.

La *Guía metodológica para la consideración del cambio climático en el SEIA* (SEA, 2023b) sugiere el uso de ARClím para la predicción hidrológica, debido a que es una fuente oficial, de acceso público a través de su plataforma *web* y cuya interfaz permite acceder a la información fácilmente. Por otro lado, se cuenta con el BHN, cuyo proceso de elaboración se inició el 2017 y finalizó en diciembre de 2022 con la publicación del estudio “Homologación de cálculo hidrológico para la estimación de la oferta natural de agua histórica y futura en Chile”.

Estas dos fuentes de información, ARClím y el BHN, son las principales referencias disponibles actualmente y de las cuales se describen algunos de sus resultados a continuación.

3.1 Atlas de Riesgo Climático (ARClím)

ARClím es una herramienta del MMA del Gobierno de Chile desarrollada por distintas instituciones académicas y colaboradores, y publicada el 2020. Este proyecto se enmarca en el Plan de Acción Nacional de Cambio Climático 2017–2022 (PANCCII), en cuyo eje de adaptación se estableció como objetivo general “fortalecer la capacidad de Chile para adaptarse al cambio climático”.

El objetivo de ARClím es desarrollar un conjunto de mapas de riesgos climáticos, empleando un marco conceptual común y una base de datos consistente. El proyecto ha tenido como guía el Quinto Reporte (AR5) del grupo de trabajo II (WGII) del IPCC (SEA, 2023a), en el que se indica que la estimación del riesgo (R) se realiza sobre la base de tres elementos básicos:

la amenaza (A), la exposición (E) y la vulnerabilidad (V), la que a su vez está determinada por la sensibilidad (S) y la capacidad adaptativa (CA)⁶.

Desde la perspectiva del usuario, la plataforma cuenta con tres secciones principales: los Mapas de Riesgo, el Explorador de Amenazas y los Mapas de Especies. De estas, el Explorador de Amenazas consiste en una interfaz con **datos climáticos** obtenidos a partir de los resultados de las simulaciones de GCM de la iniciativa CMIP-5⁷, en el escenario de emisiones RCP8.5, y que fue ajustado a una escala espacial de 0,05° x 0,05° (5x5 km) para Chile. Con esta información, el Explorador de Amenazas presenta el cambio en las condiciones climáticas entre el clima "Histórico" reciente (01ene 1980 a 31dic 2009) y las proyecciones del clima del "Futuro" intermedio (01ene 2035 a 31dic 2064)⁸.

ARClím utiliza un set de hasta 34 GCM para estimar las denominadas variables básicas, que son aquellas tomadas directamente de los resultados de los GCM.

Tabla 1. Número de GCM utilizados para determinar variables básicas en ARClím

CÓDIGO VARIABLE	DESCRIPCIÓN	UNIDADES	NÚMERO GCM	NÚMERO CORRIDAS*
pr	Precipitación diaria	mm/día	34	67
tasmax	Temperatura máxima diaria	°C	32	60
tasmin	Temperatura mínima diaria	°C	32	60
ps	Presión en superficie	hPa	34	67
uas	Velocidad zonal	m/s	25	29

⁶ Las definiciones de estos conceptos se abordan de modo extenso en la *Guía metodológica para la consideración el cambio climático en el SEIA* (SEA, 2023).

⁷ <https://pcmdi.llnl.gov/mips/cmip5/>

⁸ Cabe destacar que el MMA ha comprometido actualizar la plataforma ARClím con los GCM de CMIP-6 y los escenarios del AR6, en línea con lo provisto por parte del IPCC.

CÓDIGO VARIABLE	DESCRIPCIÓN	UNIDADES	NÚMERO GCM	NÚMERO CORRIDAS*
vas	Velocidad meridional	m/s	25	29
rsds	Radiación global horizontal	W/m ²	29	34
huss	Humedad específica	g/kg	10	10
*Corresponde al total de proyecciones disponibles al considerar las diferentes versiones (ensambles) que tiene cada GCM.				

Fuente: Pica-Téllez et al., 2020.

ARClím cuenta con un repositorio de datos climáticos desde el cual es posible descargar información extendida, en distintos formatos, de manera adicional a los disponibles en el Explorador de Amenazas Climáticas. El repositorio cuenta con dos secciones, una de **datos grillados** y otra de **datos en unidades geográficas**.

En la sección de datos grillados es posible obtener —en formato GeoTiff—, para diferentes estaciones del año, la grilla completa de Chile con los valores promedio de cada uno de los índices, para los períodos “Histórico”, período “Futuro” y delta entre ambos. Esta información representa el **promedio** de todas las proyecciones de los GCM, correspondientes para cada uno de los índices climáticos.

Por otro lado, en la sección de datos en unidades geográficas, es posible obtener dos tipos de información, la de las amenazas climáticas consolidadas y la de datos diarios. Esta información se encuentra disponible a distintas escalas espaciales, donde las principales son a nivel comunal (345 comunas) y regional (16 regiones).

Respecto de la escala temporal, los datos diarios en formato .csv se encuentran disponibles para cada GCM para los períodos “Histórico” y “Futuro”. Es decir, no se dispone de los datos continuos a nivel diario para todo el período (1970–2070).

Finalmente, el proyecto ARClím cuenta con resultados de simulaciones basadas en modelos numéricos de otras componentes del sistema terrestre (hidrósfera y océano). En el caso de la modelación de hidrología, se consideró un conjunto de 4 GCM que entregaron las forzantes

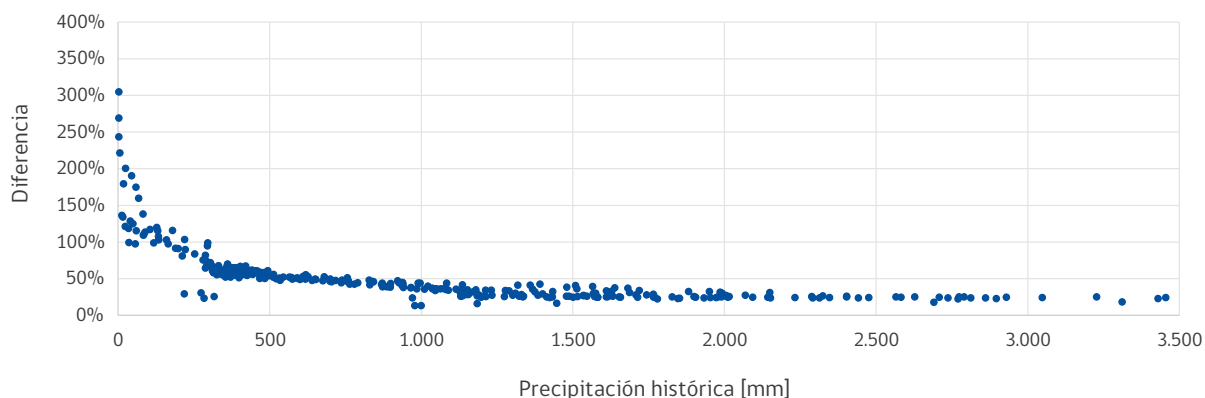
del modelo hidrológico VIC⁹, originalmente desarrolladas para el BHN, lo que permitió estimar caudales (a nivel diario y mensual) en el presente y en el futuro intermedio, para un conjunto de 116 cuencas a nivel nacional.

3.1.1 Precipitación y temperatura proyectada

De acuerdo con las proyecciones de cambio climático disponibles en ARClím, **las precipitaciones medias anuales presentarán variaciones, a nivel comunal, de entre -20% y +10% con respecto a los valores históricos** para la mayoría del territorio nacional. Cabe mencionar que estos son valores promedio, lo cual es relevante toda vez que, como se muestra en la Tabla 1, existen hasta 67 proyecciones de precipitación.

Lo anterior genera que, en algunas zonas del país, se proyecten variaciones porcentuales de precipitación que varían significativamente entre uno y otro GCM, lo cual está estrechamente relacionado con el valor de la precipitación anual histórica. De este modo, cuanto **menor** es la precipitación histórica, **mayor** es la diferencia entre el GCM más favorable y más desfavorable. La diferencia entre estas proyecciones se muestra en la Figura 7, donde se representa con un punto azul el valor de la diferencia para cada comuna del país.

Figura 7. Relación entre la precipitación histórica y la diferencia de precipitación proyectada a nivel comunal



Fuente: elaboración propia.

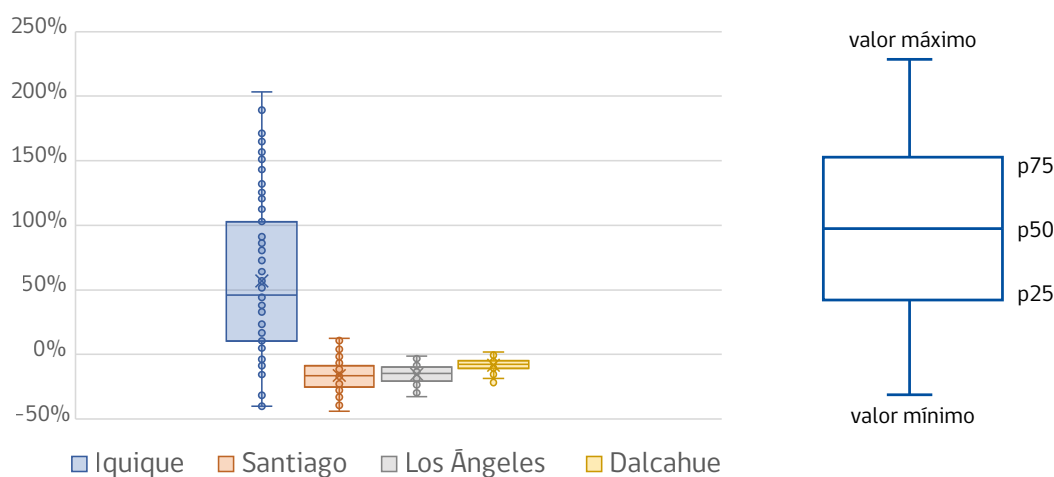
⁹ VIC es un modelo hidrológico macro-escalar, de parámetros semidistribuidos, capaz de resolver balances de agua y energía.

Así, por ejemplo, en Iquique se proyecta una variación porcentual que va desde un incremento de 200% a una disminución de casi un 50% de la precipitación; es decir, un rango de 250% aproximadamente (Figura 8, izquierda). En cambio, en zonas de mayor precipitación, como Santiago, Los Ángeles o Dalcáhue, existe mayor consenso respecto del escenario futuro de precipitaciones.

Contar con tal cantidad de proyecciones, cuyos resultados varían significativamente entre sí, sumado a la dificultad para poder verificar cuáles GCM generan mejores proyecciones, implica un desafío al momento de escoger un valor para el escenario real futuro.

Para facilitar el análisis, se presentan los resultados mediante el uso de **percentiles**¹⁰ 25% (p25), 50% (p50) y 75% (p75), lo que permite establecer un **rango de proyecciones**. De esta forma es posible definir un valor proyectado de menor (p25) y mayor (p75) magnitud de precipitación, y al mismo tiempo **dejar fuera del análisis proyecciones más extremas que podrían no ser representativas** (Figura 8, derecha).

Figura 8. Izquierda, ejemplo variación porcentual de precipitación en diagrama de caja; derecha, conceptualización diagrama de caja



Fuente: elaboración propia.

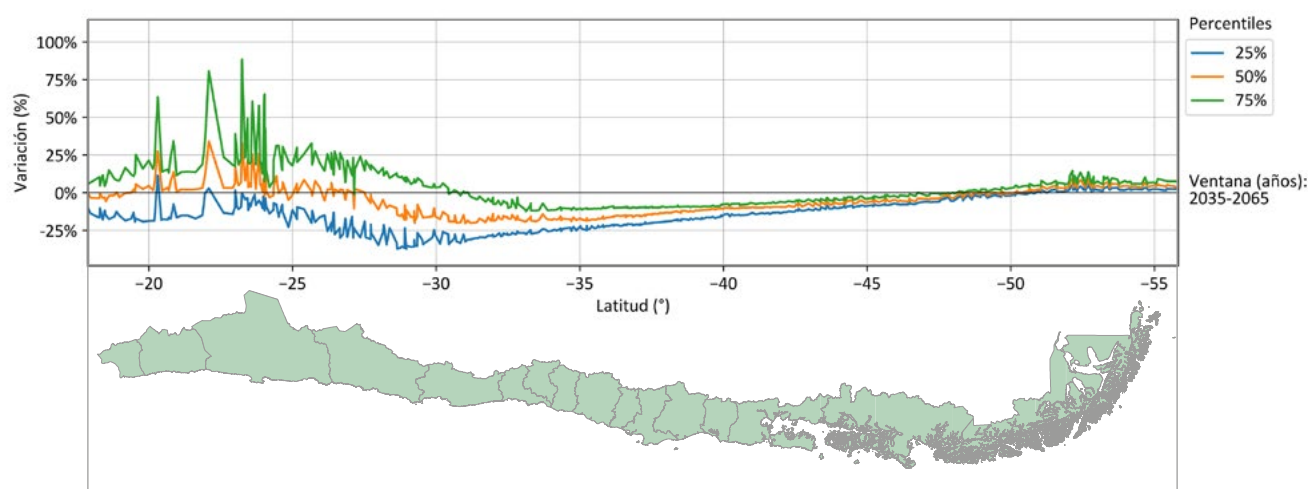
En la Figura 9 se presenta la variación porcentual de precipitación proyectada por latitud para todo Chile, entre el período histórico y el período futuro 2035–2065 para los percentiles p25, p50 y p75, donde la línea negra del 0% representa la continuidad de clima histórico. Los datos sobre esta línea indican un aumento porcentual de precipitación, y bajo ella, una

¹⁰ El percentil es una medida de posición usada en estadística que indica, una vez ordenados los datos de menor a mayor, el valor de la variable por debajo del cual se encuentra un porcentaje dado de observaciones en un grupo. Por ejemplo, el percentil 25 es el valor bajo el cual se encuentran el 25% de las observaciones, y el 75% restante son mayores.

disminución. En el análisis del gráfico es posible observar que la mayor amplitud entre los p25 y p75 se encuentra en la zona norte del país, entre la Región de Arica y Parinacota y la Región de Coquimbo (ver distancia entre la línea azul y línea verde). Como ya se mencionó, esto se debe a que la magnitud de las precipitaciones en estas zonas es más bien baja y, por lo tanto, un aumento o disminución menor en términos de milímetros totales, resulta ser significativo en términos porcentuales.

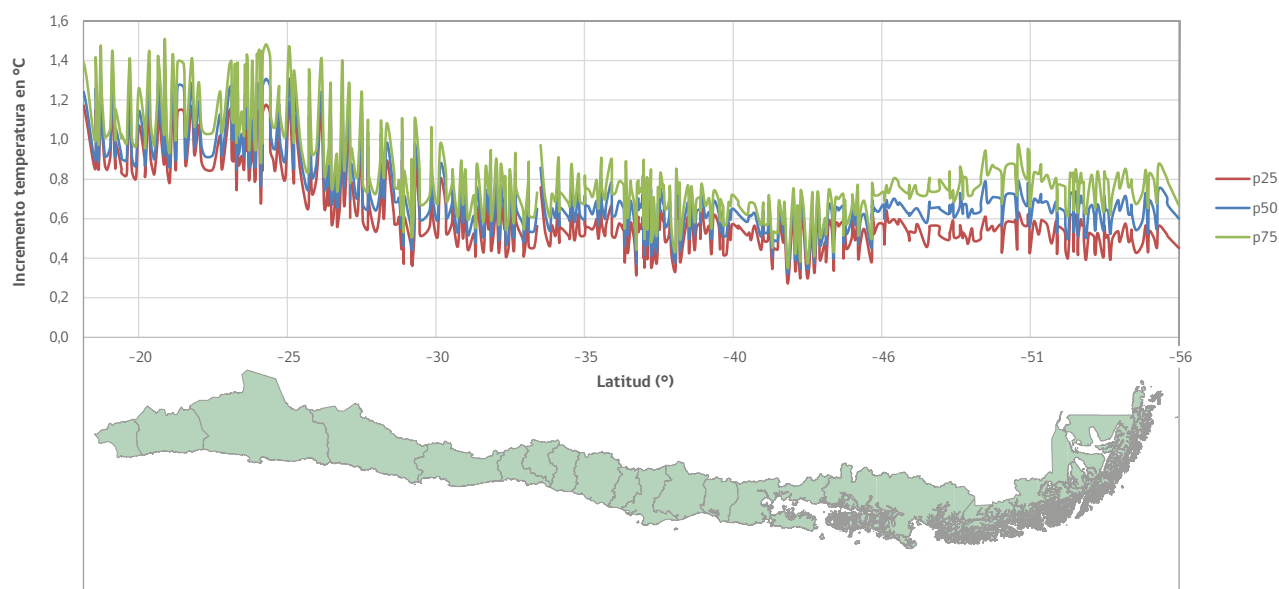
Adicionalmente, se observa que en la zona norte del país, aproximadamente la mitad de los GMC, proyectan un aumento en las precipitaciones; entre Atacama y Aysén, se proyecta una disminución, y en Magallanes, se proyecta un aumento en las precipitaciones.

Figura 9. Proyección de cambio en la precipitación ARCLim



Fuente: elaboración propia en base a SEA, 2023a.

En cuanto a la variable temperatura, en la Figura 10 se presenta el incremento en °C por latitud para todo Chile, entre el período histórico y el período futuro 2035-2065, utilizando percentiles p25, p50 y p75 a nivel de subcuenca. Cabe destacar que en este caso **el análisis se realiza en términos absolutos y no porcentuales**, toda vez que la variación de la temperatura es pequeña y estable a lo largo del país y, por lo tanto, más fácil de visualizar en términos absolutos.

Figura 10. Proyección de cambio en la temperatura ARCLim

Fuente: elaboración propia.

En consecuencia, a lo largo del país se observa un **aumento promedio de la temperatura de entre 0,4°C y 1,4°C**. Además, todos los GCM proyectan un aumento en la temperatura y la diferencia entre los percentiles p25 y p75 es de sólo 0,2°C en promedio, lo que implica menores niveles de incertidumbre para esta variable, toda vez que las proyecciones son similares entre percentiles.

3.2 Balance Hídrico Nacional

En la DGA recae la responsabilidad de elaborar el Balance Hídrico Nacional (BHN). Su última versión se encuentra en el estudio “Homologación del Cálculo Hidrológico para la Estimación de la Oferta Natural de Agua Histórica y Futura en Chile” (DGA, 2022), el cual surge de la necesidad de establecer una metodología consistente, robusta y única del cálculo hidrológico para el territorio nacional. Lo anterior con el objetivo de unificar los resultados obtenidos en las cuatro etapas de la Actualización del Balance Hídrico Nacional, desarrolladas entre 2017 y 2019.

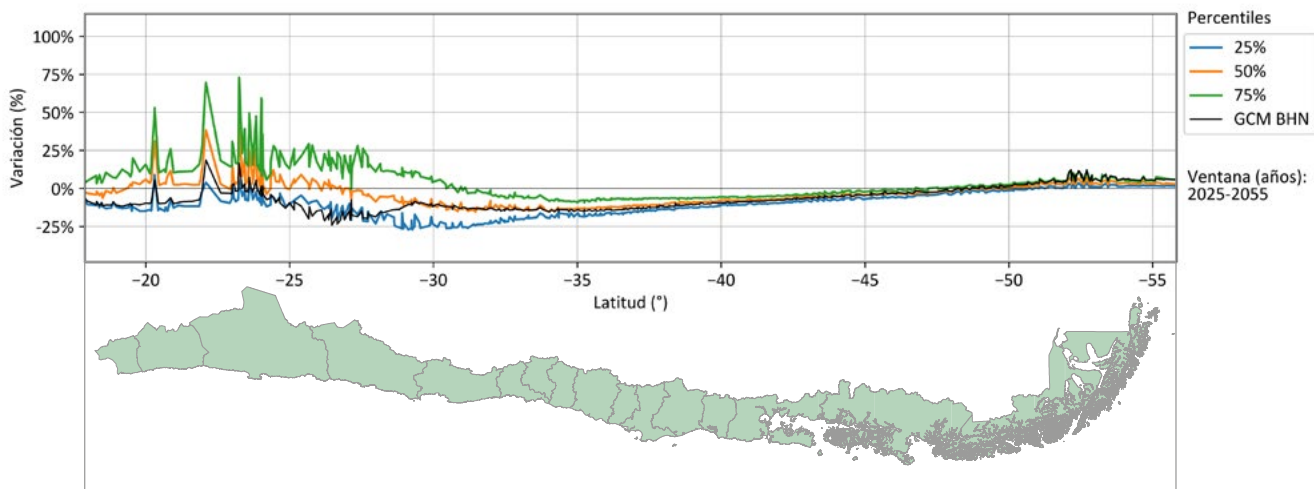
Para su desarrollo se usaron las proyecciones de cuatro modelos de circulación global (GCM) del CMIP5: CCSM4, CSIRO-MK3-6-0, IPSL-CM5A-LR y MIROC-ESM, con información grillada espacialmente de una resolución de 0,05° x 0,05°. Estos GMC fueron seleccionados por representar adecuadamente la influencia del fenómeno del Niño (ENSO) y la Oscilación Antártica (SAM), además de representar diversas sensibilidades climáticas y cambios regionales. Se utilizaron los ensambles base (r1i1p1) de estos GCM para un escenario RCP8.5.

En este último estudio de homologación del BHN, se utilizó un producto de referencia de precipitaciones y temperaturas actualizado, correspondiente a CR2Met v2.5, a diferencia de

las versiones usadas en las etapas previas. Adicionalmente, se cambió el método de corrección de sesgo desde un método de escalamiento univariado (QDM) a uno multivariable (MBCn). Por último, el período histórico utilizado para el escalamiento estadístico (corrección de sesgo) correspondió a los años 1979–2005.

En la Figura 11 se presentan las variaciones porcentuales proyectadas de precipitación para todo Chile según latitud, entre el período histórico y el período futuro 2035–2065, del promedio de los GCM del BHN (línea negra) junto con los percentiles de ARClím. Se observa que, **en la mayor parte del territorio nacional, el promedio de las proyecciones del BHN se encuentra contenido entre los percentiles p25 y p75 de ARClím.**

Figura 11. Proyección de cambio en la precipitación ARClím y BHN



Fuente: SEA, 2023a.

En la Tabla 2 se presenta una comparación entre ARClím y el BHN, donde se muestran las principales diferencias metodológicas entre ambos trabajos, siendo las más importantes el período, método y producto considerado para la corrección de sesgo. Cabe mencionar que no sería pertinente, para efectos de este documento, hacer un análisis de cuál de estas proyecciones es más acertada o de mejor calidad; sin embargo, sí es relevante conocer cuáles fueron las metodologías aplicadas y los resultados obtenidos para efectos de validar un criterio técnico aplicable a la evaluación ambiental.

Tabla 2. Comparación de metodologías ARCLim y BHN

ASPECTO	ARCLIM	BHN
Versiones de GCM	Todos los GCM disponibles en CMIP-5, incluyendo todas las versiones. RCP 8.5	Solo las versiones r1i1p1 de 4 GCM de CMIP-5. RCP 8.5
Cobertura de grilla utilizada	Ajustada a límites político-administrativos de Chile	Ajustada a límites geomorfológicos de Chile
Período de tiempo que cubren las proyecciones	Enero 1970 a diciembre 2070	Abril 1981 a marzo 2060
Producto para corrección de sesgo	CR2Met v2.0	CR2Met v2.5
Período histórico para corrección de sesgo	1979-2018	1979-2005
Método de corrección de sesgo	QM	MCBn

Fuente: SEA, 2023a.



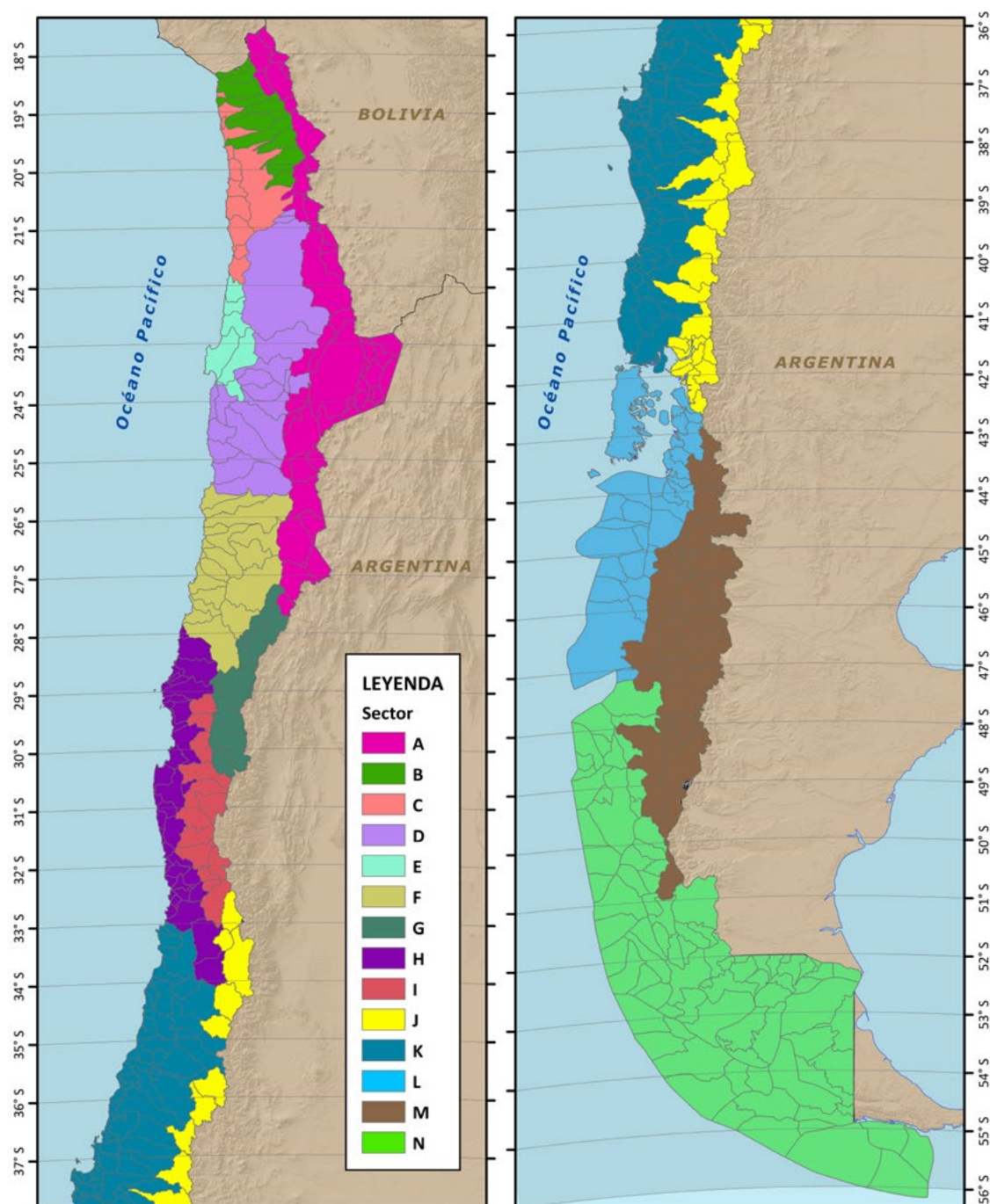
4. VARIACIONES DE PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA EN EL SEIA

De acuerdo con lo expuesto anteriormente, es claro que la estimación de proyecciones de CC está sujeta a variadas fuentes de incertidumbre y que las proyecciones disponibles actualmente arrojan resultados dispares entre sí. Por este motivo, para la utilización de esta información en el SEIA, se requiere establecer un criterio único para su uso.

A continuación se presenta un **criterio simplificado para determinar variaciones de precipitación y temperatura por efecto del CC**. Luego, en la predicción de impactos sobre el componente hídrico, se deberán utilizar estas variaciones para determinar cambios en otras variables del ciclo hidrológico, tales como el caudal, la evapotranspiración, la recarga, entre otros.

Considerando que ciertas zonas tienen un comportamiento similar en términos de proyecciones de precipitación, es que se agrupó y sectorizó el país por subcuencas con el fin de facilitar la comprensión y el uso de los datos (Figura 12). La metodología utilizada para realizar la sectorización se describe en el Anexo A.

Figura 12. Sectorización de proyecciones de precipitación



Fuente: SEA, 2023a.

Para cada uno de estos sectores se establece el **cambio proyectado porcentual** (Tabla 3) entre el período "Histórico" y período "Futuro".

Tabla 3. Valores de cambio porcentual esperado de precipitación según sectorización con respecto al período “Histórico”

SECTOR	ELEVACIÓN MEDIA [MSNM]	CAMBIO EN LA PRECIPITACIÓN (%)	
		P25	P75
A	4.140	-11,6	15,8
B	2.491	-17,6	13,5
C	960	33,7	165,6
D	1.948	-5,5	35,9
E	1.122	2,9	99,0
F	1.160	-24,1	19,8
G	3.459	-23,8	10,0
H	512	-30,5	0,2
I	1.992	-28,5	0,0
J	1.283	-18,8	-8,3
K	292	-20,1	-9,5
L	317	-8,8	-3,3
M	857	-6,8	-1,4
N	312	1,2	6,1

Fuente: SEA, 2023a.

En el caso de la temperatura no fue necesario realizar una sectorización, toda vez que las variaciones en términos absolutos (°C) son homogéneas a lo largo del país. De acuerdo con lo observado en la Figura 10, **se proyecta un incremento de 1,4°C bajo un escenario desfavorable.**

A partir de lo anterior, **se establece como criterio técnico el uso de los valores de la Tabla 3 para estimar el porcentaje de cambio en la precipitación en Chile**, así como también el incremento en la temperatura de 1,4°C bajo las siguientes consideraciones:

- Los valores indicados en la Tabla 3 son porcentajes de cambio de precipitación que deberán ser aplicados sobre los datos estadísticos históricos para obtener la proyección futura, sin necesidad de acceder a la plataforma ARCLim.
- **El escenario más desfavorable será el p25 o p75, dependiendo de con cual de estos se produce una mayor magnitud o duración del impacto identificado que se pretende predecir.** Por ejemplo, si se desea predecir el impacto por emisión de residuos líquidos en un cauce superficial, entonces la mayor afectación se generará para un escenario de menor caudal del cuerpo receptor, por lo que se deberá utilizar el p25, para luego estimar justificadamente el caudal del cuerpo receptor. En el caso de que se necesite predecir el impacto por infiltración de aguas de contacto (drenaje ácido), entonces la mayor afectación ocurrirá para un escenario de mayor precipitación, por lo que se deberá utilizar el p75.
- Dentro del Seguimiento Ambiental y Medidas, las actualizaciones de modelos numéricos que hayan quedado comprometidas en la RCA deberán actualizarse según las proyecciones de cambio en la precipitación y temperatura, en consideración de los avances de la ciencia en esta materia o futuras actualizaciones de este documento. Lo anterior no implica que los umbrales que hayan quedado establecidos en la RCA puedan ser modificados¹¹.
- En consideración de que los valores expuestos corresponden a los efectos del CC sobre la magnitud a escala temporal de años, entonces se podrá, justificadamente, utilizar supuestos para determinar variaciones en (i) la magnitud a escalas temporales menores, (ii) frecuencia de eventos o (iii) la estacionalidad, entre otros. A modo de ejemplo, en caso de requerir la estimación de un caudal medio mensual mínimo, entonces se podría asumir que el mes en el que se produce el mínimo es el mismo que en la situación histórica (supuesto iii), y que el porcentaje de cambio para ese mes en particular es el mismo que el indicado en la Tabla 3 (supuesto i).
- También será posible utilizar las alternativas mencionadas en el Anexo B para determinar proyecciones de las variables hidrometeorológicas y abordar los casos específicos planteados en el punto anterior¹².
- En el caso de que la zona de estudio se encuentre entre dos sectores, se sugiere que el porcentaje de cambio se calcule considerando un promedio ponderado según el porcentaje de área de la zona de estudio perteneciente a cada sector.
- En consideración de que los valores corresponden al cambio proyectado porcentual entre el período "Histórico" (1980–2010) y el período "Futuro" (2035–2065), los proyectos que

¹¹ Para más antecedentes sobre el Seguimiento Ambiental, revisar el documento *Criterio de evaluación en el SEIA: Contenidos técnicos para la evaluación ambiental del recurso hídrico*.

¹² En este caso, se deberá verificar que en la temporalidad anual se respeten las variaciones de precipitación y temperatura aquí propuestas.

requieran utilizar valores de precipitación posterior al 2065 podrán usar los mismos valores de la Tabla 3 o las alternativas mencionadas en el Anexo B.

- Es particularmente importante utilizar con criterio los resultados de precipitación que se obtienen en la zona norte del país, donde es posible evidenciar que los sectores C y E proyectan variaciones porcentuales elevadas, algo que podría parecer contra intuitivo al comparar con el resto de los sectores. Estos valores elevados de cambio ocurren debido a que las precipitaciones históricas son valores muy bajos (incluso cercanos a 0 mm/año en algunos sectores), por lo que cualquier aumento proyectado se traduce en una variación porcentual elevada (SEA, 2023a). Por lo tanto, en estos sectores también se deberá presentar la estadística del período histórico de referencia (1980-2010), para así verificar que no sea muy diferente de la estadística actualizada hasta la fecha de presentación al SEIA.

Finalmente, respecto de esta metodología, se debe tener en cuenta lo siguiente:

- El período “Histórico” utilizado en ARClím no considera los últimos años de sequía, por lo que, en el caso de las precipitaciones, al aplicar los valores de la Tabla 3 a la estadística histórica hasta la fecha de presentación al SEIA se obtendrán resultados conservadores cuando la mayor afectación se genere en un escenario de menor precipitación (p25).
- El uso del escenario RCP8.5, considera el más desfavorable desde el punto de vista de las emisiones de GEI, pero no necesariamente generará el peor escenario de precipitación o temperatura para la evaluación de impacto ambiental. Sin embargo, dado que son las proyecciones disponibles de forma oficial, entonces el SEA considerará su uso válido como el escenario más desfavorable.
- En el caso de que ARClím sea actualizado mediante la incorporación de GCM posteriores a CMIP-5, o la consideración de otros escenarios de emisión, entonces la metodología y valores aquí presentados seguirán siendo válidos mientras este documento no sea actualizado.
- El uso de los percentiles p25 y p75, a partir de las proyecciones de ARClím, permite considerar un escenario de cambio climático que, para la mayoría del territorio nacional, es más desfavorable que el promedio de las proyecciones del BHN.

4.1 Ejemplo de aplicación

A continuación se describe un ejemplo de aplicación de las variaciones de precipitación y temperatura propuestas anteriormente.

Caso hipotético: “Proyecto de planta de tratamiento de agua potable”

- Descripción de partes, obras y acciones:** el proyecto consiste en una planta de tratamiento de agua potable, cuya fuente de agua son las aguas subterráneas y que ingresa al SEIA el 2029.
- Identificación de impacto:** alteración de los niveles de agua subterránea, el flujo pasante y el volumen embalsado del acuífero.

c) Caracterización:

1. De acuerdo a la localización del proyecto y al factor generador de impacto (bombeo), se determina que la cuenca que recarga al acuífero es parte de los sectores H e I. A partir de la información geográfica, se calcula que un 90% de la cuenca pertenece al sector H y el 10% restante pertenece al sector I.
2. Se recopila la estadística de precipitaciones de los últimos 30 años, es decir, desde el 2000 al 2029, y se determina una precipitación media anual de 310 mm en la parte de la cuenca perteneciente al sector H y de 330 mm en la parte de la cuenca perteneciente al sector I.
3. **Dado que el escenario más desfavorable ocurrirá para una menor precipitación, puesto que generará una menor recarga del acuífero, el porcentaje de cambio quedará determinado por el percentil p25**, es decir, -30,5% para el sector H, y -28,5% para el sector I.
4. Para obtener valores de precipitación proyectada en un escenario futuro con cambio climático, se multiplica la precipitación anual por el porcentaje de precipitación proyectada. Por lo tanto, se obtiene una precipitación de **215,5 mm ($310 \text{ mm} \cdot (100\% - 30,5\%)$)** para el sector H y de **236,0 mm ($330 \text{ mm} \cdot (100\% - 28,5\%)$)** para el sector I. Debido a que el proyecto genera impactos en dos sectores, H e I, se debe proceder luego a la ponderación por área, lo que entrega un resultado final de **217,5 mm ($215,5 \text{ mm} \cdot 90\% + 236,0 \text{ mm} \cdot 10\%$)**¹³.
5. La temperatura media anual para el período 2000-2029 se estimó en 6°C. Dado que la menor recarga se generará para un escenario de mayor temperatura, la temperatura media anual con cambio climático será de 7.4°C (6.0°C+1.4°C).

d) Predicción de impacto: para la predicción de impactos se requiere de la elaboración de un modelo hidrogeológico, para lo cual se debe estimar la recarga al acuífero que se verá afectada por el efecto del CC sobre las precipitaciones y la temperatura.

1. Mediante un análisis de la estadística histórica de precipitación y niveles de agua subterránea a nivel diario, se concluye que solamente ciertos eventos de precipitación generan recarga, la que se estima en un 7% de la precipitación media anual. Asumiendo que el cambio climático no incide en la magnitud o frecuencia de los eventos diarios, entonces el porcentaje de recarga se mantiene igual. Con ello se obtiene una recarga en la condición futura de 15,2 mm ($217,5 \text{ mm} \cdot 7\%$)

¹³ De forma alternativa, también el cálculo se puede realizar aplicando los porcentajes de representación de cada sector (90% y 10%) sobre los percentiles de variación de la precipitación esperados (-30,5% y -28,5%). En este caso, el porcentaje de cambio de precipitación ponderado será de -30,3% ($-30,5\% \cdot 90\% + -28,5\% \cdot 10\%$). En esta alternativa de cálculo luego corresponderá multiplicar el cambio ponderado por la precipitación histórica correspondiente a cada sector ($310 \text{ mm} \cdot (100 - 30,3)\% \cdot 90\% + 330 \text{ mm} \cdot (100 - 30,3)\% \cdot 10\%$), lo cual arrojará los mismos resultados finales.

2. De forma alternativa, mediante el método de Turc¹⁴, el cual utiliza como parámetros la precipitación media anual (217,5 mm) y la temperatura media anual (7.4°C), se estimó que la recarga bajo el escenario de cambio climático es de 10 mm.
3. Dado que **el peor escenario (menor recarga) se genera con el método de Turc**, para el modelo numérico hidrogeológico se utiliza una recarga de 10 mm/año en un escenario de cambio climático.

¹⁴ El método de Turc permite estimar la recarga a base de un balance simple entre la precipitación y evapotranspiración en la cuenca. La evapotranspiración es estimada a partir de la propia precipitación y el poder evaporante de la atmósfera en el sector en estudio que, a su vez, se puede estimar a base de la temperatura representativa de la zona.



5. APLICABILIDAD DEL CRITERIO METODOLÓGICO

De acuerdo con lo establecido en la *Guía Metodológica para la consideración del cambio climático en el SEIA* (SEA, 2023b), el criterio de decisión para determinar si un proyecto debe considerar el CC en la evaluación ambiental es que **se identifiquen sinergias negativas sobre un mismo componente ambiental por el efecto conjunto entre el CC y los impactos de un proyecto.**

Este criterio es válido para la aplicación de las metodologías propuestas en este documento, donde toma especial relevancia en la identificación de sinergias negativas el analizar **la duración de los efectos del proyecto sobre el medio ambiente.** Cabe destacar que la duración de los efectos puede diferir de la duración de las acciones que lo provocaron, tal como sucede con la extracción de agua subterránea. La lentitud del flujo de aguas subterráneas incide en que los efectos puedan expresarse mucho tiempo después, incluso posterior al cierre del proyecto. Por otro lado, una descarga de residuos líquidos en un cauce superficial genera una alteración que podría terminar al mismo tiempo en que se detiene la descarga sobre el cuerpo receptor.

.....

Si un proyecto y el cambio climático generan un efecto conjunto sobre el recurso hídrico, entonces se deberá incorporar el análisis del efecto del cambio climático para evaluar la significancia de los impactos, lo que implicará incluir los cambios en precipitación y temperatura en el área de influencia.

.....

En consideración de lo anterior, **las DIA y EIA deberán realizar la predicción y evaluación de impactos del proyecto considerando el CC mediante la metodología expuesta en el presente documento**, en los casos que corresponda. La no aplicabilidad de este análisis deberá estar debidamente justificada.

Finalmente, cabe mencionar que **la incorporación del CC en la obtención de los permisos 155, 156, 157, 158 y 159 no será aplicable.** Ello se justifica en que sus normas fundantes, es decir, el Código de Aguas y la Ley N°11.402, no lo consideran.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Bürger, G., S. R. Sobie, A. J. Cannon, A. T. Werner, and T. Q. Murdock. 2013. Downscaling extremes: An intercomparison of multiple methods for future climate. *J. Climate*, 26, 3429–3449, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00249.1>.
- Cannon, A. J., S. R. Sobie, and T. Q. Murdock., 2015. Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: How well do methods preserve changes in quantiles and extremes? *J. Climate*, 28(17), 6938–6959, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00754.1>.
- Chadwick, C., Gironás, J., González-Leiva, F., and Aedo, S., 2023. Bias adjustment to preserve changes in variability: the unbiased mapping of GCM changes. *Hydrological Sciences Journal*, <https://doi.org/10.1080/02626667.2023.2201450>
- CSIRO and Bureau of Meteorology 2015, *Climate Change in Australia Information for Australia's Natural Resource Management Regions: Technical Report*, CSIRO and Bureau of Meteorology, Australia.
- Cubasch, U., D. Wuebbles, D. Chen, M.C. Facchini, D. Frame, N. Mahowald, and J.-G. Winther, 2013: Introduction. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- DGA, 2022. "Homologación del cálculo hidrológico para la estimación de la oferta natural de agua histórica y futura en Chile". SIT N°524. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile. Elaborado por Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- IPCC, 2013. "Resumen para responsables de políticas. En *Cambio Climático 2013: Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*" [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América.
- IPCC, 2021: *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.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp. doi:10.1017/9781009157896.
- NOAA, 2012. Descripción del primer modelo climático basado en interacciones entre el océano y la atmósfera. Publicación web disponible en https://celebrating200years.noaa.gov/breakthroughs/climate_model/welcome.html

- Pica-Téllez, A.; Garreaud, R.; Meza, F.; Bustos, S.; Falvey, M.; Ibarra, M.; Duarte, K.; Ormazábal, R.; Dittborn, R. & Silva, I.; 2020. Informe Proyecto ARCLim: Atlas de Riesgos Climáticos para Chile. Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia, Centro de Cambio Global UC y Meteodata para el Ministerio del Medio Ambiente a través de la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). Santiago, Chile.
- SEA, 2023a. Consultoría para la Incorporación del Cambio Climático en la Evaluación Ambiental del Recurso Hídrico. Servicio de Evaluación Ambiental, División de Evaluación Ambiental y Participación Ciudadana, Santiago, Chile. Elaborado por: Hídrica Consultores SpA.
- SEA, 2023b. Guía metodológica para la consideración del cambio climático en el SEIA. Primera edición, Servicio de Evaluación Ambiental, Santiago, Chile. Disponible en el Centro de Documentación del sitio *web* del SEA, www.sea.gob.cl
- Switanek, B. M., Troch, P., Castro, L. C., Leuprecht, A., Chang, H. I., Mukherjee, R., and Demaria, M. C. E., 2017. Scaled distribution mapping: A bias correction method that preserves raw climate model projected changes. *Hydrology & Earth System Sciences*, 21, 2649–2666, <https://doi.org/10.5194/hess-21-2649-2017>.
- Wood, A. W., E. P. Maurer, A. Kumar and D. P. Lettenmaier, 2002: Long-Range Experimental Hydrological Forecasting for the Eastern United States. *J. Geophys. Res.: Atmos.*, 107(D20), <https://doi.org/10.1029/2001JD000659>.



1. ANEXO A. Metodología de agrupación

Para realizar la sectorización territorial de las proyecciones de ARClím, se utilizó la herramienta *Spatially Constrained Multivariate Clustering*, disponible en el *software* ArcGIS. Esta herramienta corresponde a una técnica de *clustering* o agrupación, que utiliza métodos de *machine learning*, considerados no supervisados, puesto que no requieren un conjunto de características preclasificadas para guiar o entrenar a determinar la agrupación de datos.

A partir de una cantidad de *clusters* (agrupación) a crear, la herramienta busca una solución en la que todas las características dentro de cada *cluster* sean lo más similares posible, y que los *clusters* sean lo más diferentes entre sí, de acuerdo a las características seleccionadas. Entonces, el algoritmo utilizado emplea un gráfico de conectividad o árbol de expansión mínimo llamado SKATER para encontrar grupos y evaluar la probabilidad de pertenencia a cada grupo. Las consideraciones utilizadas para realizar la sectorización fueron las siguientes:

- **Uso de subcuencas como unidad espacial:** La unidad de trabajo durante este estudio fue la subcuenca, por lo que, para efectos de realizar la sectorización de las variables precipitación y temperatura, la agrupación fue realizada a partir de éstas. La herramienta utilizada considera la información proyectada en cada una de las subcuencas y las agrupa considerando los criterios definidos.
- **Cercanía:** Uno de los factores que considera la agrupación y que es parte de las consideraciones propias del algoritmo utilizado, es que la sectorización se realice a partir de subcuencas que se encuentren geográficamente cercanas.
- **Valores de p25 y p75:** Dentro de los criterios utilizados se consideró que la sectorización cumpla con agrupar subcuencas donde los percentiles 25 y 75 de las variaciones proyectadas sean similares. Estos percentiles corresponden a los establecidos como la envolvente de las proyecciones para las distintas variables, explicado con más detalle en la sección 3.1.1. De esta forma la sectorización permite identificar las zonas que mantienen proyecciones

similares, tanto para las variaciones proyectadas en p25 como p75, manteniendo así una envolvente similar.

- **Ventanas de tiempo:** Adicionalmente, la sectorización considera sectores que mantengan una envolvente similar para las distintas ventanas de comparación utilizadas (2015–2045, 2025–2055 y 2035–2065, respecto a 1980–2010). De esta forma la agrupación identifica aquellas subcuencas que proyectan una variación similar, tanto en tiempo como en espacio.
- **Elevación:** De manera complementaria a que la sectorización considere subcuencas cercanas y variaciones proyectadas similares, ésta además incluye la categorización por elevación (m.s.n.m.). Se incorpora, entonces, en la sectorización la variabilidad en función de la elevación como parte de los criterios adoptados.
- **Refinamiento final:** Finalmente, una vez realizada la sectorización, considerando los criterios mencionados, se verificó que ésta fuese razonable y concordante con los criterios adoptados. Se realizó una pequeña corrección con aquellas subcuencas que presentan proyecciones muy distintas al resto de subcuencas y, por lo tanto, para efectos del algoritmo son asignadas por sí solas a un único sector. Estos casos son mencionados en la presentación de la sectorización establecida.

En consecuencia, una vez realizada la sectorización, se determinaron los valores de la envolvente y valor esperado considerando una ponderación por área de las subcuencas de cada sector. Así, para cada uno se definieron las proyecciones de cambio esperado tanto en p25 como p75, estableciendo así la envolvente, para cada ventana de tiempo. Finalmente, de manera complementaria y utilizando la misma forma de cálculo, se definió el valor medio esperado como el promedio de las proyecciones que se encuentran dentro de la envolvente p25 a p75. Esto permitió omitir aquellas proyecciones que se encuentran más alejadas de la tendencia general de los GCM y no afectar la estimación al momento de establecer la media.



2. ANEXO B. Alternativas para obtención de variables hidrometeorológicas bajo escenarios de CC

2.1 Proyecciones propias

De forma similar a lo descrito en el marco conceptual del acápite 2, otra forma de considerar los efectos del CC es mediante la estimación de proyecciones propias, lo que puede ser particularmente necesario cuando se requiere proyectar el comportamiento de **(i) las precipitaciones a escalas temporales menores, (ii) considerar el cambio en la frecuencia de eventos o (iii) la estacionalidad**, entre otros. Para ello se entregan las siguientes directrices.

- **Escenarios y GCM**

Se podrán realizar proyecciones de CC mediante el uso de GCM del CMIP-6 (o posterior), los cuales cuentan con una cobertura temporal de 1850 a 2014 para los datos históricos y de 2015 a 2100 para proyecciones según escenarios SSPx-y. Se recomienda utilizar al menos dos escenarios, siendo uno desfavorable (SSP5-8.5) y otro menos desfavorable (SSP2-4.5) en términos de emisiones, para luego seleccionar el resultado que genere la mayor alteración sobre el recurso hídrico.

Se sugiere que la elección de los GCM que se van a utilizar se base en algún análisis previo que fundamente su elección. Los resultados obtenidos representarán diferentes condiciones futuras proyectadas, lo que se debe analizar considerando diferentes escenarios con distinto impacto, siempre evaluando como parte del análisis una situación desfavorable. Para la determinación de los valores que se usarán en la evaluación ambiental, se podrá utilizar algún criterio estadístico, similar a lo realizado con la metodología ARCLim.

- **Escalamiento espacial**

Respecto de la corrección del escalamiento (*downscaling*), se recomienda utilizar alguno de los siguientes; MBCn (Cannon et al., 2016), UQM (Chadwick et al., 2023), QDM (Cannon et al., 2015), SDM (Switanek et al., 2017), DQM (Bürger et al., 2013), QM (Wood et al., 2002).

- **Corrección de sesgo**

Se recomienda evaluar el método apropiado para realizar el proceso de corrección de sesgo según las necesidades del estudio y la evidencia respectiva sobre el uso de cada método. Adicionalmente, se sugiere que la corrección de sesgo se realice con información histórica sólo para el período histórico de los modelos, es decir, hasta 2014 para el caso de los GCM del CMIP-6. De este modo se evita la posible influencia de variaciones de los estadísticos en las proyecciones como parte del ajuste a la información observada.

Para realizar la corrección de sesgo se debe utilizar información observada para adoptar las tendencias y proyecciones de los GCM al comportamiento local. Para realizar esta corrección, es importante que la información utilizada represente lo ocurrido históricamente. En este sentido, una fuente de información ampliamente utilizada en Chile para la corrección de sesgo de las variables de precipitación y temperatura son los productos CR2Met, que cuentan con distintas actualizaciones, siendo la más reciente la versión 2.5. Sin embargo, es importante notar que la corrección de sesgo para los GCM del CMIP-6 debiese realizarse con información hasta 2014, correspondiente al período histórico de estos. Por lo tanto, las versiones 1.4, 2.0 y 2.5 podrían ser utilizadas para este propósito, al poseer información más allá del 2014.

De forma alternativa al CR2Met, se podrá generar un producto grillado propio con información local observada que represente de buena forma la situación local. Ello se recomienda principalmente en zonas donde existe mayor sesgo o se dispone de información adicional a la utilizada en la generación de los productos CR2Met, como por ejemplo en el norte del país.

- **Temporalidad**

La información de los GCM se dispone de manera diaria y mensual, por lo que se sugiere que se trabaje con una escala determinada según los objetivos del estudio específico. Esto debido principalmente a que usar la información a una escala diaria puede significar un gran trabajo adicional al utilizar diversos GCM. Por lo tanto, se recomienda definir apropiadamente la escala temporal sobre la que se utilizarán estas proyecciones.

Por otro lado, es importante tomar en consideración que los resultados del análisis de las proyecciones climáticas dependerán de las ventanas "Histórica" y "Futura" consideradas. En este sentido, se recomienda evaluar ventanas temporales de igual longitud en caso de analizar brechas o cambios esperados. Se recomienda utilizar períodos de al menos 30 años para la caracterización de condiciones particulares.

2.2 Balance Hídrico Nacional

El Balance Hídrico Nacional, en su última versión, correspondiente al estudio “Homologación del Cálculo Hidrológico para la Estimación de la Oferta Natural de Agua Histórica y Futura en Chile” (DGA, 2022), provee de una fundamentación metodológica consistente, lo que lo convierte en una fuente factible para analizar escenarios futuros mediante cambios esperados y evolución de los componentes hídricos.



REF: OBSERVACIÓN FALTA DE INFORMACIÓN ESENCIAL GLACIARES.

**ANT.: PROYECTO EXPANSIÓN LOS BRONCES INTEGRADO
ANGLO AMERICAN SUR.**

**Señor
Director
Servicio de Evaluación Ambiental
Presente**

De mi consideración:

Por la presente, y de conformidad con lo previsto en el artículo 15 bis de la Ley N°19.300, sobre Bases Generales del Medioambiente, hago presente que en esta observación que EIA del Proyecto Expansión Los Bronces Integrado, de Anglo American Sur, posee falta de información esencial, al carecer de antecedentes imprescindibles para evaluar y dimensionar adecuadamente los impactos que el proyecto representa en el componente **glaciares**, tomando en cuenta que el consumo de agua de las personas de a lo menos tres comunas, depende del agua que entregan los glaciares de la Cuenca del Mapocho, pues como es público conocimiento solo los glaciares mantienen mínimamente el recurso agua en la Cuenca del Mapocho, lluvias prácticamente ausentes lo mismo que la nieve, son en definitiva en el contexto de cambio/emergencia climática las reservas de agua de Santiago. Por lo anterior, paso a exponer:

i. No se consideran todos los glaciares que existen en el área de influencia del proyecto.

El primer criterio de sustentabilidad que declara cumplir el titular del proyecto es *“No afectación de glaciares”*, sosteniendo que *“la fase subterránea se desarrolla en roca primaria, y, el método de explotación seleccionado “Sublevel Stoping con pilares y relleno de caserones”, evitando la afectación de los objetos de conservación del Santuario de la Naturaleza Fundo Yerba Loca; que además, el Proyecto no contempla obras ni desarrolla actividades que se ubiquen en dicha área bajo protección oficial, ni en su entorno*

adyacente.”. Concluye señalando que “el área de influencia de esta componente queda definida por (i) glaciar Altar Sur, "más cercano" a las tronaduras del Área Los Bronces Subterráneo; (ii) glaciar Observatorio, "más cercano" a las tronaduras de la ampliación oriente del rajo en el Área Los Bronces; y (iii) glaciar Infiernillo, "más cercano" a las tronaduras de la ampliación poniente del rajo en el Área Los Bronces.” (las negritas y cursivas pertenecen a esta presentación)

Es decir, **el titular circunscribe el área de influencia del proyecto sólo a 3 glaciares**, asumiendo que el área de influencia está determinada a partir de la afectación de las tronaduras e incluyéndolos de forma parcial, **omitiendo información esencial respecto del área de influencia del proyecto** al no identificar y evaluar el área total de todos aquellos glaciares que alberga el Santuario de la Naturaleza Yerba Loca, especialmente el glaciar descubierto La Paloma, que abastecen la cuenca del río Maipo, desconociendo de esta forma los criterios entregados por el Servicio de Evaluación Ambiental en su guía para la descripción del área de influencia, entre los cuales podemos destacar los siguientes:

- (i) Criterio 1: “el área de influencia corresponde al espacio geográfico de donde se obtiene la información necesaria para predecir y evaluar los impactos”, lo que involucra el área donde se encuentra el túnel del proyecto;
- (ii) Criterio 2: el área de influencia se entiende como el espacio terrestre, aéreo o acuático, dependiendo del elemento del medio ambiente receptor, con lo cual dicha obra subterránea, y el área donde está circunscrita, no está exenta de ser considerada;
- (iii) Criterios 3 y 4: el Área de Influencia incluye los elementos del medio ambiente que son objeto de protección del SEIA, de acuerdo al artículo 11 de la Ley y artículo 18 del Reglamento, incluyendo:
 - (i) Medio físico, dentro de los cuales se incluyen los glaciares dentro de los objetos de protección.
 - (ii) Ecosistemas relacionados con el mencionado Santuario y glaciares, ya sean terrestres (suelo, plantas, hongos, animales silvestres, entre otros) y acuáticos continentales (calidad de agua, sedimentos, biota, entre otros) así como las relaciones entre ambos ecosistemas.

- (iii) Áreas protegidas y sitios prioritarios dentro de los cuales se cuenta el Santuario de la Naturaleza Yerba Loca y todos los glaciares incluidos en el área de influencia.
- (iv) Atractivos turísticos, dentro de los cuales se incluye el mencionado Santuario y glaciares considerando el valor turístico/paisajístico que ellos presentan.

En este sentido, el **Departamento de Planificación del Gobierno Regional Metropolitano** hace presente que **el trazado del túnel del proyecto está por debajo del glaciar La Paloma, pero que éste no fue considerado en la caracterización de la línea de base del proyecto ni tampoco en el área de influencia de éste.**

En la misma línea, **del informe de la DGA se desprende que no se incluye dentro del área de influencia del proyecto los glaciares de la cabecera de Yerba Loca, especialmente el glaciar Paloma Oeste**, y, en cuanto al área del **glaciar Infiernillo** señaló que **se debía considerar su área total**, incluyendo su área intervenida.

Sernatur, por su parte, señala que **no se consideraron los glaciares La Paloma, Olivares y Observatorio**; y de la presentación del **Ministerio de Bienes Nacionales** se desprende claramente que la afirmación del titular en cuanto a que el Proyecto no contempla obras ni desarrolla actividades que se ubiquen en área bajo protección oficial, ni en su entorno adyacente, es errónea, en la medida que **el Bien Nacional Protegido –BNP- “Río Olivares colinda con el área denominada “Los Bronces Subterráneo” y en el referido BNP, se encuentra una porción del glaciar “Olivares Alfa”, que se verá significativamente afectado por la explotación del mineral** en los caserones subterráneos los que requieren perforación y tronaduras constantes durante la fase de operación, generando vibraciones cuyo impacto debe ser objeto de evaluación.

Por su parte, el **Ministerio de Agricultura** en su presentación, en relación al **glaciar Olivares**, solicitó precisar la distancia a la mina subterránea y las medidas o condiciones que aseguren la no afectación de éste, lo que deja en evidencia que esto no se contempla en el EIA.

En consecuencia, **la información del EIA en cuanto al área de influencia del proyecto es insuficiente al no incluir una descripción del perímetro de cada glaciar,**

cartografía, fotomontajes, imágenes satelitales, modelos tridimensionales, estudios de microsismicidad y toda la información necesaria para establecer los reales impactos que la actividad, tanto subterránea como a rajo abierto pueda tener en los glaciares, que son los reservorios de agua dulce de la Región Metropolitana y la V Región.

La información que omite el titular se vincula directamente con lo dispuesto en las letras b) y d) del artículo 11 de la Ley N°19.300, por cuanto no identifica ni evalúa efectos adversos significativos sobre la cantidad y calidad del recurso renovable agua, lo que reviste enorme importancia en el actual escenario al que se enfrenta la Región Metropolitana de prolongado déficit hídrico y sequía, lo que ha llevado a las autoridades a declarar emergencia agrícola en 17 comunas de esta región, lo que se suma al fenómeno del cambio climático, al que el titular contribuye significativamente producto de las emisiones de gases de efecto invernadero generados por sus actividades.

2. Se omite en la línea de base el túnel Los Sulfatos.

En segundo lugar, el titular omite en su línea de base la existencia del Túnel Los Sulfatos, debiendo considerarlo, en conformidad a lo dispuesto en el artículo 11, letra d) de la Ley N°19.300 y la letra e.1) del artículo 18 del Reglamento, consistente con los criterios para la identificación del área de Influencia, atendido que se encuentra en o próximo a un glaciar -La Paloma y Altar- y en el área protegida Santuario de la Naturaleza Fundo Yerba Loca.

Al respecto, cabe tener presente lo que la Municipalidad de Lo Barnechea señaló: *“... en lo referente al **Túnel Los Sulfatos**, al no considerarse como parte del presente EIA, desconocemos el actual y eventual impacto ambiental que tiene. Si bien se presenta como una obra de "exploración", por su magnitud, características y dado que permitió valorizar las reservas del yacimiento, constituye una obra de "prospección", así actualmente en el mencionado túnel se realizan a lo menos en cuatro puntos trabajos de sondeo en todas direcciones.*

Por lo anterior y no habiendo encontrado ningún análisis en el presente relativo a los efectos de este túnel en los glaciares debajo de los cuales pasa, como tampoco en relación a ningún componente ambiental, ni como parte de la compensación de emisiones, se solicita incorporar al Túnel Los Sulfatos al presente estudio de impacto ambiental sumando todos sus efectos presentes y futuros como parte del "Proyecto Los Bronces Integrado", no correspondiendo realizar discriminaciones arbitrarias de exclusión que contrarían texto expreso de ley (artículo 11 letra d) de la Ley N°19.300).” (las negritas y cursivas son nuestras)

Sobre el particular, cabe considerar además lo señalado por el glaciólogo Francisco Ferrando, en cuanto a que **la formación El Abanico**, en donde se encuentra ubicado el Túnel Los Sulfatos, **no sólo está compuesta por roca primaria, sino que por numerosas fallas con estructuras de menor solidez**, pudiendo encontrarse en la construcción del proyecto fallas que puedan hacer colapsar el túnel y con ello afectar gravemente los glaciares.

Numerosos estudios coinciden en que la formación rocosa donde pretende ejecutarse el proyecto no está compuesta en su mayoría por roca primaria - contrariamente a lo sostiene el titular- sino que por numerosas fallas, en una composición hidrotermal propia en donde se encuentran los sulfuros de cobre, que fluyen precisamente a través de estas fallas, pero esto no es considerado en forma deliberada por el EIA de Anglo American.

En suma, **el titular no incluye en la línea de base una descripción detallada del Túnel Los Sulfatos y de todas aquellas instalaciones asociadas**, y reitero lo señalado en presentación anterior sobre agua, en cuanto a que **no existe un mapeo 3D que permita determinar la verdadera estructura de la roca que compone la formación rocosa en donde se ubica el Túnel Los Sulfatos, ni respecto del lugar donde se pretende ejecutar el proyecto, falta de información que puede, incluso, poner en riesgo la estabilidad de los glaciares de superficie** y los posibles escurrimientos de agua desde los glaciares a las napas aguas abajo, lo que resulta determinante para poder evaluar sus impactos, lo que hace muy insuficiente el EIA de Anglo American.

En este orden de cosas, las omisiones del titular impiden identificar las condiciones necesarias para asegurar que cada uno de los efectos, características o circunstancias que genera el proyecto se encuentren debidamente identificados; ni menos aún, se han descrito las correspondientes medidas de mitigación, reparación y/o compensación asociadas a cada uno de ellos. Es por ello que resulta imposible continuar con su evaluación, por cuanto las omisiones denunciadas no son susceptibles de ser subsanadas mediante solicitudes de aclaraciones, rectificaciones o ampliación de información, pues todas ellas exigen la presentación de información en etapas tempranas, que no es el caso de la información cuya omisión de denuncia, y amerita, en consecuencia, estimo que el EIA carece de información estructural en relación a un estudio acabado de la estructura del macizo en donde se encuentra ubicado el proyecto, falta en definitiva información esencial. Es tan flagrante lo expuesto en relación a falta de información esencial que actualmente Anglo American se encuentra como dijimos mas arriba haciendo sondajes en el túnel Los Sulfatos, pues evidentemente no tienen claro ni los lugares en donde se encuentra el mineral ni la estructura del macizo. ***Lo uno conlleva a lo otro, como se puede diseñar un modelo de explotación (que se presentó en EIA), si en la actualidad se están haciendo sondajes para determinar la ubicación de los mantos mineralizados y si no se sabe en donde están los mantos mineralizados, como se puede conocer a priori la estructura rocosa del macizo en donde se ubicará un posible proyecto minero. Todos sabemos lo extremadamente oneroso que son los sondajes, y tener 4 puntos de realización de sondajes sin el sentido expresado, no se entiende y menos las certezas expresadas en el EIA, también por lo mismo se requiere de un mapeo 3D de un posible futuro proyecto.***

Cabe hacer presente que en estas condiciones **no existen garantías para la realización de un proceso de participación ciudadana informada y oportuna**, toda vez que en la medida que se restringió el área de influencia del proyecto se han subestimado sus impactos, careciendo, por consiguiente, la ciudadanía de toda la información necesaria para poder pronunciarse sobre el proyecto, lo que no se condice con el principio de buena fe y transparencia que debe primar en la materia, poniendo además en riesgo el derecho a vivir en un medio ambiente libre de contaminación y la preservación de la naturaleza.

3. No existe estudio que respalde la emisión de material particulado que el titular del proyecto señala que emitirá, ni un estudio serio de modulación de los vientos, (a lo menos existen 4 direcciones de viento en la alta cordillera); no se contempla una estación on line permanente que entregue informes de la cantidad de material particulado, ni que en base a la dirección de los vientos se programen las tronaduras en el rajo abierto que impidan un daño por el depósito de polvo sobre los glaciares que circundan la operación de Los Bronces.

El EIA del proyecto de expansión Andina 244, en lo referido a los glaciares, señaló que 10 gramos de polvo sobre un metro cuadrado de un glaciar acelera su derretimiento entre un 73 y 94%. El titular del proyecto en evaluación, respecto del límite de material particulado sobre glaciares señala 20 mg/m2/día, cifra que es tremendamente preocupante, y además, tal como señala la DGA, no fue posible confirmar su justificación. *Es evidente desde varios puntos de Santiago oriente la nube de polvo producida en la actualidad por la faena de Los Bronces de Anglo American Sur, y nuestra preocupación es que ese polvo acelere aún mas el derretimiento de los glaciares de la Cuenca del Mapocho , basado ese temor en las cifras entregadas por el EIA de Andina 244.*

El EIA de Los Bronces Integrado sólo se limita a señalar que no se afectarán los glaciares, debido a que la depositación de polvo sobre los glaciares disminuye el efecto albedo, por lo que es muy grave que el EIA no menciona ningún estudio referido al régimen de vientos en la zona del proyecto ni entrega las cifras de afectación a los glaciares que sí entregó Andina 244 apenas unos años atrás, desatendiendo de esta forma el estado del arte en esta materia y la capacidad técnica que existe para su estimación.

Al respecto, cabe tener presente que la DGA señala que el EIA indica con respecto a MPS que *"la depositación no alcanza en magnitud significativa la parte alta del estero Yerba Loca"*, sin embargo, **no justifica con datos la no afectación de los glaciares que se encuentran en dicho sector.**

En charlas ciudadanas, realizadas por Anglo American para presentar el proyecto Los Bronces Integrado, denominadas “Casa Abierta” , los glaciólogos e hidrólogos de la empresa señalaron que el polvo producido en el faena sube de manera vertical y desciende de la misma manera. Lo anterior es por decir lo menos irrisorio considerando que la Dirección de Aeronáutica Civil restringe los vuelos, (helicópteros), en la alta cordillera de la Cuenca del Mapocho debido a los fuertes vientos que se levantan durante la tarde. Es otro aspecto en el cual Anglo American ha pretendido eludir la realización de un estudio serio concerniente a este punto.

La DGA también destaca que el proyecto **no considera instalar y mantener un monitoreo de material particulado sobre los glaciares blancos cercanos al proyecto durante la fase de construcción y operación ni realizar estudios constantes de variación de albedo para asegurarse que el material particulado no afecte a la reflectancia natural de los glaciares descubiertos de la parte alta del valle del estero Yerba Loca.**

Cabe considerar que según diversas estadísticas y estudios, en la zona de la alta cordillera, donde se pretende emplazar el proyecto, los vientos registran diferentes direcciones. El habitual, el viento Raco o Puelche, que es el que en la noche sopla desde la cordillera al mar, y durante el día por una situación térmica, sobretodo en los día de más calor, sopla en dirección contraria, es decir, desde el valle hacia cumbres de cordillera. Pero existen otras dos direcciones que tienen que ver con el viento en situación de dominio del anticiclón del Pacífico, esto es, un viento que sopla en dirección sur a norte. La dirección del viento cambiará en dirección contraria en situaciones de bajas presiones, sin necesidad que ocurran lluvias. Situaciones que no han sido consideradas por en la evaluación.

Consecuentemente, no se contempla una estación en línea de monitoreo permanente que entregue informes de la cantidad de material particulado (fácilmente observable desde la ciudad), ni un programa de acuerdo a la dirección de los vientos para programar las tronaduras en el rajo abierto que impidan un daño por el depósito de polvo sobre los glaciares que circundan la operación de Los Bronces y que a la vez permitan llevar a cabo planes de contingencia cuando dichas mediciones o programas no cumplan con lo modelado y evaluado por el estudio de impacto ambiental.

El propio proyecto de Andina 244 reconocía daños concretos sobre el entorno de glaciares -misma zona geográfica- entregando cifras de incremento derretimiento de 1,6 litros por segundo. Este se produce debido a las tronaduras en el rajo abierto y por el intenso tráfico de camiones llevando mineral hacia el chancado y estéril a los botaderos, además del polvo que generan los tranques de relaves. Este polvo es trasladado por los diferentes vientos de acuerdo a condiciones climáticas y horas del día y se deposita en los glaciares. El polvo en suspensión al depositarse en los glaciares disminuye el efecto albedo, acelerando su derretimiento.

Al respecto, hay que considerar que el EIA señala que se explotarán dos nuevos rajos al oriente y poniente del actual rajo, más la faena subterránea bajo el Santuario Yerba Loca, lo que evidentemente afectará los glaciares por las detonaciones de la minería a rajo abierto y por la microsismicidad que genere la explotación subterránea, a lo que además se debe sumar que existirá un mayor flujo de camiones de alto tonelaje para, entre otros, el traslado de estériles para rellenar los caserones, movimiento de camiones con material estéril a los botaderos, el del mineral al chancado, el traslado de caliza (cemento) a la faena para la fabricación de la mezcla necesaria para el relleno de los caserones, etc.

Y a lo anterior se debe añadir los impactos acumulativos y sinérgicos que tiene en la alta cordillera la minera Andina, contigua a Los Bronces.

Por lo anterior, **señalo que el EIA de Los Bronces Integrado de Anglo American Sur posee graves faltas de información esencial que impiden identificar las condiciones necesarias para asegurar que cada uno de los efectos, características o circunstancias que genera el proyecto se encuentren debidamente identificados;** ni menos aún, se han descrito las correspondientes medidas de mitigación, reparación y/o compensación asociadas a cada uno de ellos.

Finalmente, adhiero a las observaciones formuladas por la DGA, especialmente en lo tocante a:

1. En el EIA **no se usa la codificación entregada por el inventario nacional de glaciares de la DGA**, que a su vez se basa en los nombre oficiales de la cartografía IGM y,

por ejemplo, se identifican fragmentos desprendidos desde el glaciar Paloma Este (CL105721065) con denominaciones diferentes a las oficiales.

2. En cuanto a las “intervenciones autorizadas” en el área superficial del Glaciar Infiernillo, el titular sostiene que *"Existe un sector del glaciar, en su parte baja (línea discontinua en Figura GL-4), que se encuentra afectado por diversos tipos de intervenciones superficiales autorizadas."*, sin embargo, no señala los antecedentes en base a los cuales se justifican dichas intervenciones.

3. En Punto 3.13.6.1. Área Los Bronces. Se señala lo siguiente: *"se estima una tasa de descenso de su superficie de 0,15 metros/año. De esta forma, se puede estimar que esta zona del glaciar perdería toda su masa (hielo) en los próximos 100-200 años"*, sin embargo, **no se especifica cómo se obtuvo la estimación** ni se refiere a la importancia de esta información para la evaluación ambiental del proyecto.

4. Respecto del glaciar Altar Sur se señala que perderá 10-20 m en el próximo decenio en su zona descubierta, ii) que **se convertirá en un glaciar rocoso en un plazo de 15 a 20 años** y que iii) este glaciar disminuiría su aporte hídrico de entre un 15% a un 20% producto del cambio de estado, sin embargo, **no se indica los argumentos que llevaron a dichas conclusiones, con los correspondientes estudios asociados**, si fuese necesario. En suma, estimamos, conforme se ha analizado, que los antecedentes faltantes son esenciales para la adecuada evaluación del proyecto, no son subsanables, y ameritan, por consiguiente declarar la falta de información esencial. No entenderlo pondría en serio riesgo las reservas de agua de la Región Metropolitana, ya bastante amenazadas con los efectos de la minería, la sequía y el cambio climático.

En este escenario, corresponde que la autoridad adopte su decisión con estricto apego al principio precautorio, sobretudo considerando la solidez de las argumentaciones de los servicios, especialmente los de la DGA.

Cristóbal Enrique del Río Siggelkow
Camino Huallalolen 19.411 Lo Barnechea, Stgo.
cristobaldelrios@icloud.com

F: +56 9 92322619



Anthropogenic influence on surface changes at the Olivares glaciers; Central Chile



Martina Barandun^{a,b,*}, Claudio Bravo^c, Bernard Grobety^d, Theo Jenk^{a,e}, Ling Fang^a, Kathrin Naegeli^{f,g}, Andrés Rivera^h, Sebastián Cisternas^c, Tatjana Münster^a, Margit Schwikowski^{a,e}

^a Laboratory of Environmental Chemistry, Paul Scherrer Institute, Villigen, Switzerland

^b Institute of Earth Observation, EURAC research, Bolzano, Italy

^c Glaciología y Cambio Climático, Centro de Estudios Científicos (CECs), Valdivia, Chile

^d Department of Geosciences, University of Fribourg, Fribourg, Switzerland

^e Oeschger Centre for Climate Change Research, University of Bern, Bern, Switzerland

^f Department of Geography, Remote Sensing Laboratories, University of Zurich, Zurich, Switzerland

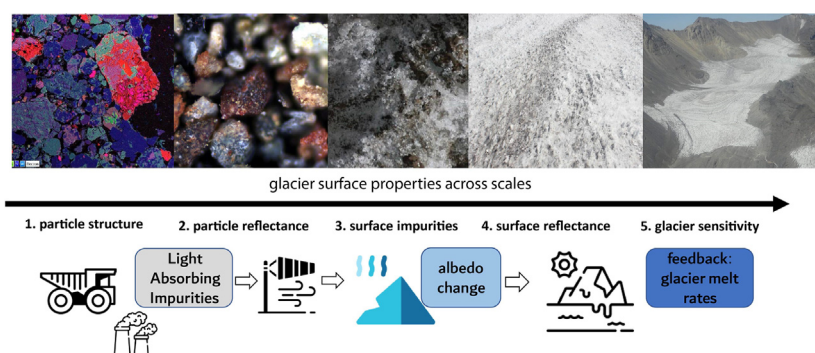
^g Institute of Geography and Oeschger Centre for Climate Change Research, University of Bern, Bern, Switzerland

^h Departamento de Geografía, Universidad de Chile, Santiago, Chile

HIGHLIGHTS

- Combining across-scale light-absorbing impurity analysis with melt modeling
- Chemical and mineralogical properties show mobilized particles from mine deposits.
- Light-absorbing impurities contribute to elevated mass loss of Olivares glaciers.
- Mass balance is sensitive to ice albedo changes.
- Accelerated seasonal snow albedo might be responsible for above-average mass loss.

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Editor: José Virgilio Cruz

Keywords:

Light-absorbing impurities
Glacier albedo across scales
Glacier mass balance sensitivity
Mining activities

ABSTRACT

We have investigated the source and role of light-absorbing impurities (LAIs) deposited on the glaciers of the Olivares catchment, in Central Chile. LAIs can considerably darken (lowered albedo) the glacier surface, enhancing their melt. We combined chemical and mineralogical laboratory analyses of surface and ice core samples with field-based spectral reflectance measurements to investigate the nature and properties of such LAIs. Using remote sensing-based albedo maps, we upscaled local information to glacier-wide coverage. We then used a model to evaluate the sensitivity of surface mass balance to a change in ice and snow albedo. The across-scale surface observations in combination with ice core analysis revealed a history of over half a century of LAIs deposition. We found traces of mining residuals in glacier surface samples. The glaciers with highest mass loss in the catchment present enhanced concentrations of surface dust particles with low reflectance properties. Our results indicate that dust particles with strong light-absorbing capacity have been mobilized from mine tailings and deposited on the nearby glacier surfaces. Large-scale assessment from satellite-based observations revealed darkening (ice albedo lowering) at most investigated glacier tongues from 1989 to 2018. Glacier melt is sensitive to ice albedo. We believe that an accelerated winter and spring snow albedo decrease, partially triggered by surface impurities, might be responsible for the above-average mass loss encountered in this catchment.

* Corresponding author at: Laboratory of Environmental Chemistry, Paul Scherrer Institute, Villigen, Switzerland.
E-mail address: martina.barandun@eurac.edu (M. Barandun).

1. Introduction

Impurities on snow and glacier surfaces consist typically of aerosols, rock fragments from the surrounding valley walls, glacial deposits, and/or organic matter (e.g. Naegeli et al., 2015; Cook et al., 2016; Dal Farra et al., 2018; Barraza et al., 2021). Light-absorbing impurities (LAIs) are materials that present high absorption in the visible range of the solar spectrum (390–700 nm, Dal Farra et al., 2018). LAIs are typically grouped into black carbon (BC), organic matter, and mineral dust (Warren, 1980), and can considerably reduce snow and ice albedo (Takeuchi et al., 2001). BC refers to the strongly light-absorbing component of soot and is emitted both naturally and anthropogenically by incomplete combustion of fossil fuels and biomass burning. Organic matter, such as humic substances, can be transported or produced in situ through biogenic processes. The highest accumulations of organic matter are found in cryoconite holes on glacier surfaces (Cook et al., 2016). Cryoconites substantially reduce glacier surface albedo (Takeuchi et al., 2001). Mineral dust particles present a wide range of different reflectance properties (Dal Farra et al., 2018). The main sources of mineral dust are arid regions with low vegetation cover where fine-grained material is available and mobilized (Di Mauro et al., 2015). Mineral dust production and deposition has increased over time in many regions (Di Mauro et al., 2015).

The strongest driver for ablation on alpine glaciers is net shortwave radiation (e.g. Brock et al., 2000; Klok and Oerlemans, 2004; Pellicciotti et al., 2008; Ayala et al., 2016; Schaefer et al., 2020), and the amount of solar radiation that is absorbed at the glacier surface depends strongly on the surface albedo. Thus, glacier surface albedo determines a large amount of the energy available for snow and ice melt throughout the year. The glacier surface presents low albedo values in the ablation zone, where ice is exposed at surface over most of the summer season (e.g. Paul et al., 2008). The longer this surface is exposed, the more solar radiation will be absorbed. Rising air temperatures prolong the melting season, reduce the extent of the snow cover, and lead to shorter winter seasons. Consequently, the dark ablation surface is exposed longer to the atmosphere. This causes a positive feedback, enhancing surface melt significantly (Oerlemans and Hoogendoorn, 1989; van der Wal et al., 1992; Paul et al., 2007; Naegeli et al., 2019). Due to the increase in absorption of solar radiation by the deposited absorptive impurities, the feedback is further enhanced and can thus impact significantly on the energy balance at the glacier surface (Box et al., 2012; Brun et al., 2015; Tedesco et al., 2016). Fresh snowfall reflects a large part of the incoming solar radiation, covers the dark ice surface, and protects it from melt. During the ablation period, snow can, for a short period of time—until it melts again—, lower or even stop melt. In autumn, snowfall becomes more frequent and eventually controls the glacier-wide albedo. Factors that affect snow albedo reduction include snow aging, grain size, solar zenith angle, snow depth, the impurity ice/mixing state, particle morphology, liquid water, and presence of LAIs (Wiscombe and Warren, 1980; Warren, 1984; Hansen and Nazarenko, 2004).

Andean glaciers have a more negative specific mass balance ($0.7 \text{ m w.e. yr}^{-1}$) for the past two decades than glaciers in most other regions worldwide (Dussaillant et al., 2019; Braun et al., 2019; Zemp et al., 2019). Main drivers for this enhanced mass loss are ongoing atmospheric warming and decreasing precipitation trends (Falvey and Garreaud, 2009; Garreaud et al., 2017). Glacier mass loss in the Andes is an important contributor to sea level rise ($\approx 3 \text{ mm}$ sea-level equivalent from 1961 to 2016) (Zemp et al., 2019) and represents an essential water resource for the region: snow and ice melt can contribute by up to 50% to the total annual river runoff (Huss et al., 2017). Huss and Hock (2018) modeled an up to 30% reduction in glacier melt water release into the rivers of the Central Andes in the next 100 years under an emission scenario RCP4.5 (Representative Concentration Pathways 4.5).

An acceleration of glacier mass loss for the Maipo River basin in Central Chile since 2010 has been highlighted (Fariás-Barahona et al., 2020; Dussaillant et al., 2019; Hugonnet et al., 2021), partly related to the ongoing mega drought event (Ayala et al., 2020; Garreaud et al., 2020). Long-term in situ mass balance observations at Echaurren Norte Glacier

underlined this trend, showing enhanced mass loss since 2009 (WGMS, 2021; Fariás-Barahona et al., 2019; Masiokas et al., 2016). The Olivares catchment, a subcatchment within the Maipo River basin (Fig. 2), presents a more than twice as high glacier mass loss rate since the mid 1950s ($0.29 \pm 0.1 \text{ m w.e. yr}^{-1}$) compared with the glaciers in the surrounding subcatchments (Fariás-Barahona et al., 2019). Dussaillant et al. (2019) reported a similar accelerated mass loss within the catchment from 2000 to 2018 and encountered exceptionally negative mass balance rates for the glaciers Olivares Alfa ($0.85 \pm 0.1 \text{ m w.e. yr}^{-1}$) and Paloma Norte ($0.97 \pm 0.1 \text{ m w.e. yr}^{-1}$).

To date, this above-average glacier mass loss remains unexplained. Causal links have been suggested between the role of dust particles from mining activity and dramatic mass loss of glaciers, in particular for Olivares Alfa and Paloma Norte (Cereceda-Balic et al., 2014; Malmros et al., 2016; Fariás-Barahona et al., 2020; Ayala et al., 2020), although clear evidence is still lacking (Shaw et al., 2021). Cereceda-Balic et al. (2020) found substantially higher BC concentrations in the atmosphere and in snow samples from Olivares Alfa in comparison with the more southern located Bello glacier (Colorado catchment). Both glaciers are situated at $\approx 60 \text{ km}$ distance to the capital city Santiago (Cereceda-Balic et al., 2020), which represents a major source of atmospheric pollution too, such as for urban BC (Huneeus et al., 2021; Lapere et al., 2021). Alfonso et al. (2019) and Rowe et al. (2019) showed increased concentrations of anthropogenic LAIs in snow samples for different sites in Central Chile. The authors highlighted elevated concentrations not only of BC but also of mineral dust, that has significant effects on snow reflectance properties.

The source and role of LAI deposition on ice and snow albedo and its associated effect on the magnitude of ablation for the Olivares catchment are not well understood. This study aims at (1) characterizing the origin and composition of LAIs detected in snow and ice, (2) quantifying the surface albedo and its spatiotemporal variability based on *in situ* measurements and satellite imagery, and (3) analyzing the sensitivity of ablation processes to snow and ice albedo changes for the glaciers located in the Olivares catchment using numerical modeling.

2. Study site

2.1. Climate and local meteorological conditions

The Olivares catchment is part of the Maipo River basin and is located in the semiarid Andes Cordillera of Central Chile about 50 km Northeast of Santiago (Fig. 1). This is one of the most glaciated areas (111 km^2 in 1955) of the Maipo River basin (Ayala et al., 2020). In the present study, we focus on the glaciers Olivares Alfa, Olivares Beta, Paloma Norte, and Juncal Sur (Table 1) but also show results for Barroso IV and Cerro Negro glaciers (Fig. 2).

Atmospheric conditions over the Olivares catchment are determined by the interaction of the Andes with large-scale circulation patterns. This catchment is under the influence of the southeast Pacific anticyclone all year around, centered at 30°S (Garreaud et al., 2013), but several synoptic mechanisms (e.g., cold fronts), including those transporting water vapor from low latitudes as atmospheric rivers, cause midlatitude storms and precipitation events over the catchment. Observed total annual precipitation over the western Andes between 32°S and 34°S ranges from 300 mm to 900 mm, depending on the location and elevation of the meteorological station (Viale et al., 2019). Over 75% of the total annual precipitation over this region occurs between April and September due to the passage of cold fronts (Viale et al., 2019). Summer precipitation due to predominant convective events also occurs but only represents around 10% of the total annual precipitation (Viale and Garreaud, 2014). Most precipitation in the Olivares catchment falls as snow (Mardones and Garreaud, 2020). Interannual variability depends on global-scale atmospheric–oceanic circulation patterns such as El Niño Southern Oscillation (ENSO), Madden–Julian Oscillation (MJO), or the Interdecadal Pacific Oscillation (IPO), among others (Garreaud, 2009; Garreaud et al., 2009). During the warm phase of ENSO (El Niño), positive anomalies in precipitation tend to occur, while during

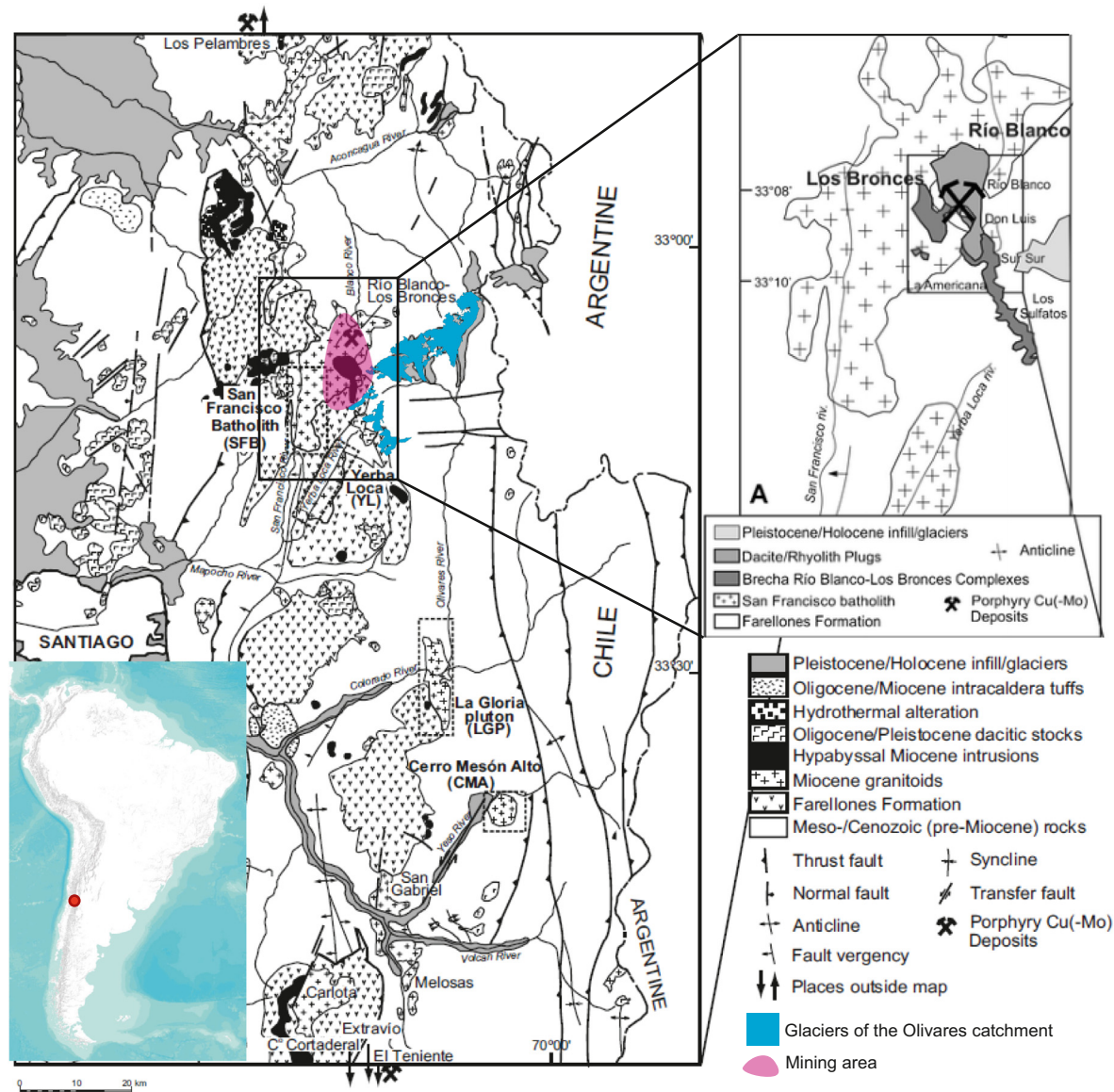


Fig. 1. Overview of the geology of the study region. Glaciers of the Olivares catchment highlighted in blue and approximate mining area in red. Inset A showing simplified geological map of the San Francisco batholith intruded into the Farellones formation (preintrusive volcanic suite) and the Río Blanco-Los Bronces breccia complexes with postmineralization dacite/rhyolite plugs. Río Blanco, Don Luís, Sur Sur, La Americana, and Los Sulfatos sectors host important Cu(-Mo) mineralization. See Appendix A.1.1 for more details. Modified from Deckart et al. (2005, 2013).

cold ENSO (La Niña), below-average precipitation is generally recorded (Masiokas et al., 2020). However, since the mega drought, negative anomalies occurred also during la Niña, El Niño, and neutral ENSO phases (Garreaud et al., 2017). The interannual variability of precipitation has been accompanied by an overall trend of precipitation decrease (e.g. Boisier et al., 2018) and a significant temperature increase in the region between 1979 and 2015 (e.g. Burger et al., 2018). Furthermore, the Andes between 30°S and 38°S have been affected by an extensive dryness since 2010,

the so-called mega drought (Garreaud et al., 2017, 2020). During the mega drought, mean annual air temperature increased up to ≈ 0.8 °C and annual precipitation decreased up to a 50% compared with the 1986–2009 period at some locations (Shaw et al., 2021). Reduction of annual precipitation and vegetation health led to land cover degradation, exposing soil to erosion. This might have intensified the amount and transportation of airborne dust particles (e.g. Shepherd et al., 2016; Al Ameri et al., 2019).

Table 1
Topomorphological characteristics of investigated glaciers based on RGIv6.0 (RGI, 2017).

Glacier	Mean elevation (m asl)	Max elevation (m asl)	Min elevation (m asl)	Mean slope (°)	Area (km ²)
Juncal Sur	4450	5745	3826	18.1	21.04
Olivares Beta	4463	4924	3894	15.2	7.44
Olivares Alfa	4574	5037	4259	13.8	3.2
Paloma Norte	4614	4794	4452	9.5	0.6

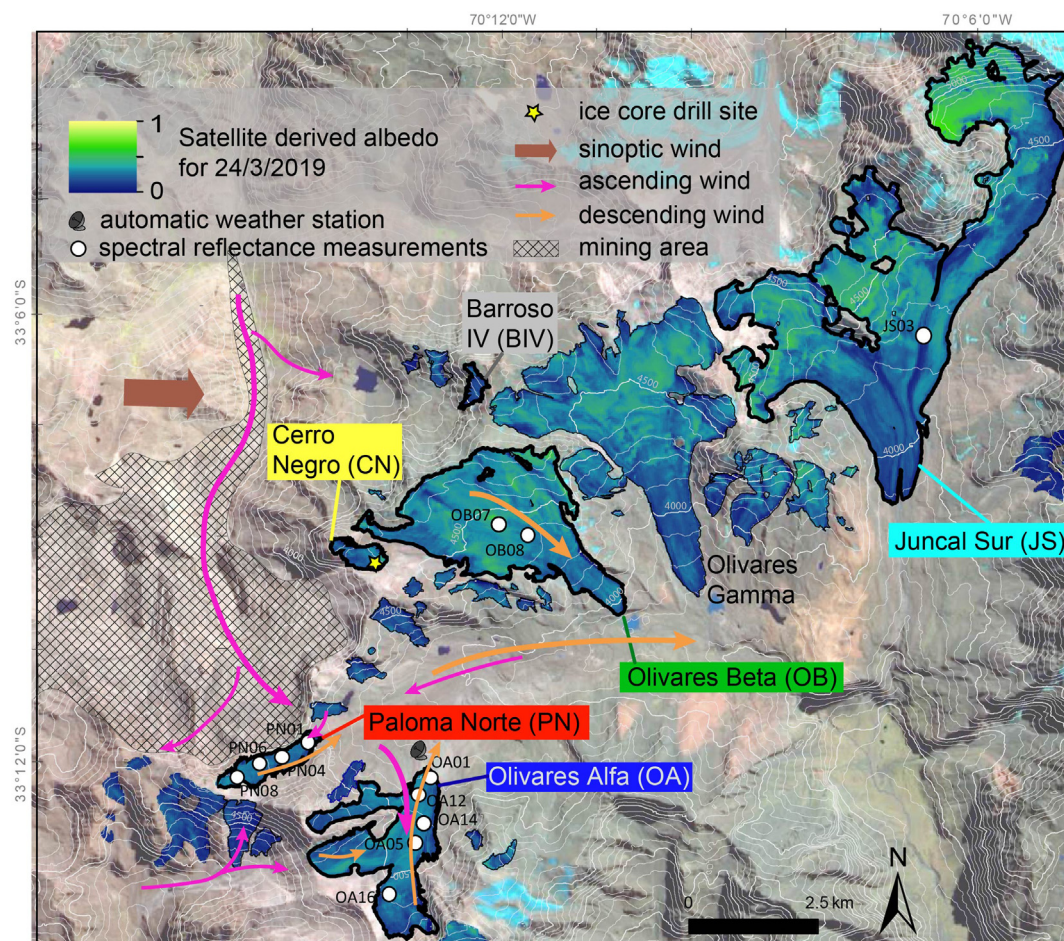


Fig. 2. Overview of the Olivares catchment on a almost snow free Landsat satellite end-of-summer image. Colored names highlighting glaciers focused in this study. Color shading within perimeters showing albedo information. White dots indicating location of field spectrometer measurements. Yellow star indicating drill location. Colored arrows indicating wind direction according to [Codelco Chile \(2019\)](#). Dashed area indicating approximated area directly affected by mining activity.

2.2. Geology and mining activities

First mining activities in this region date back to 1864 ([Brenning, 2008](#); [Brenning and Azócar, 2010](#)). Today, two large copper mines are operated next to the Olivares catchment: Los Bronces and Andina (Río Blanco) mines. These mines are located northwest of the Olivares catchment area at the southeastern corner of the San Francisco batholith ([Fig. 1](#)). Explosive pressure release related to hydrothermal activity led to the formation of tourmaline-specularite (hematite)-sulfide-bearing breccia pipes ([Deckart et al., 2013](#)). Andina and Los Bronces mines are located in the breccia pipes area ([Dold and Fontboté, 2001](#)). More details on the geology and mining history of the area are provided in Appendix A.1.1. The glaciers Paloma Norte, Cerro Negro, and Olivares Beta, including the bounding ridges, are free of breccia pipe outcrops ([Fig. 1](#)).

Mineralization in the breccias contains pyrite, the chalcopyrite, bornite, and molybdenite. Large volumes of the breccias contain >3 wt% pyrite and >4 wt% chalcopyrite. In contact with surface water in a natural environment, pyrite oxidizes directly to ironoxyhydroxides. In the mine waste deposits (oxidation zone of sulfidic mine tailings), the oxidation of pyrite in contact with water leads to the formation of sulfuric acid and the lowering of the pH. This low pH leads to the precipitation of minerals such as the alkali iron hydroxy sulfate jarosite $KFe_2(SO_4)_2(OH)_6$ (pH: less3) or iron oxohydroxy sulfate schwertmannite $Fe_8O_8(OH)_6(SO_4)_4 \cdot nH_2O$ (pH: 3–6). [Dold \(2003\)](#) found both minerals in the oxidized upper layer of the tailings of the Piquenes impoundment, where the pH is low enough for their

formation (pH: 2.1 — 3.5). Jarosite survives only in arid environments while, under more humid conditions and at higher pH, decomposes to ironoxyhydroxides and a sulfate phase such as gypsum ([Madden et al., 2004](#)). If jarosite reaches the surface, the only way for it to survive is to be immediately protected from liquid water (e.g., by burying it very rapidly under snow which falls periodically in the accumulation area). Jarosite cannot form under natural conditions on the glacier surface in the Olivares catchment.

3. Data and sampling

3.1. Remote sensing datasets: coarse scale

We used the glacier outline from 2020 based on PlanetScope data provided in [Shaw et al. \(2020\)](#) and added the outline of Paloma Norte manually delineated from a Sentinel-2 scene of 2020. We downloaded 856 scenes of the Landsat Surface Reflectance Level-2 science product (cloud cover less than 50% and spatial resolution of 30 m) for the Olivares Catchment (Landsat 4–5 TM, Landsat 7 ETM+, and Landsat 8 OLI) covering the period 1986–2019. The scenes used for glacier-wide albedo maps consist of six (TM/ETM+) or seven (OLI) individual spectral bands in a wavelength range of around 440 nm to 2300 nm ([Masek et al., 2006](#); [Vermote et al., 2016](#)). We used the freely available void-filled Shuttle Radar Topography Mission (SRTM, [Jarvis et al., 2008](#)) digital elevation model (DEM) as topographic input.

3.2. Field sampling and measurements: local scale

In February 2019, we visually identified the following dominant glacier surface types: water, cryoconites, bright ice, dirty ice, and ice with few debris. Before taking surface ice samples (Section 3.3), we conducted field-based surface reflectance measurements (Fig. 3F) of each surface type at each sampling location spread over the different glaciers (12 sites) in a field of 20×20 cm (Figs. 2 and 3). At each sampling location, we also measured the reflectance spectra of a field of 4×4 m. Sample locations were selected to represent the entire ablation area and various elevation bands of the glaciers.

3.3. Data collected for laboratory analysis: particle to microscopic scale

In February 2019, we took 65 ice surface samples to investigate the chemical and mineralogical composition of LAIs. We sampled all visually identified glacier surface types (3–5 samples per site, Fig. 3) at 10 sample locations on Olivares Alfa, at 3 locations on Olivares Beta, at 4 locations on Paloma Norte, and at 1 location on Cerro Negro, Barroso IV, and Juncal Sur, each. All dominant surface types were sampled for each location when present (Fig. 3A–F). We collected a surface sample of each surface type for which a reflectance spectra was recorded. Sample area was typically 20×20 cm large and 1–2 cm deep (Fig. 3G). Larger rock fragments (not wind transported) were sampled from Olivares Alfa, Paloma Norte, and Olivares Beta.

A 7.43 m-long ice core was collected on Cerro Negro (Chile, $33^{\circ}08'37.5''$ S, $70^{\circ}13'38.5''$ W, 4604 m asl, Fig. 2) on April 30, 2017. This location was part of the accumulation area (surface heightening) in the past, but in recent years, the equilibrium line moved above the ice core drill site. This resulted in the recently observed surface lowering.

3.4. Data used for numerical modeling: across scales

To run a mass balance model, climate data were obtained from ERA5-Land reanalysis (Muñoz-Sabater et al., 2021). Hourly air temperature and incoming shortwave radiation recordings were downloaded between the years 1990 and 2020. The mass balance model, however, runs with a

daily time step. To determine air temperature at the elevation of each glacier pixel, we used air temperature lapse rates derived from the closest weather stations (for location see Fig. 2) managed by the Dirección General de Aguas (DGA). These weather stations were Valle Olivares and Glaciar Olivares Gamma, located at 2840 m asl and 3600 m asl, respectively, below the limit of the glaciated area of the catchment. The obtained mean air temperature lapse rate was $-8.4^{\circ}\text{C km}^{-1}$. We used Landsat-based albedo maps (Section 4.1.1) for distributed ice albedo model input and for snow albedo aging estimates during the winter season.

4. Methods

An overview of the workflow is shown in Fig. Appendix A.1.

4.1. Remote sensing observations: coarse scale

4.1.1. Glacier albedo change

We derived spatially distributed shortwave broadband albedo maps from Landsat satellite imagery (TM, ETM+, OLI) for all available scenes from 1986 to 2019 based on Naegeli et al. (2019). After cloud filtering and masking out Scan Line Correction (SLC)-off void-stripes (Naegeli et al., 2019), we applied the narrow-to-broadband conversion by Liang (2001) to obtain shortwave broadband albedo from the individual spectral bands. We separated snow-covered from ice pixels following Barandun et al. (2021) and Naegeli et al. (2019). This surface classification is based on the surface albedo of snow and ice over the glacier area and takes into account their spatial distribution. Due to the limited availability of suitable images prior to 1989, we calculated the trends from 1989 to 2018. For this period, one end-of-summer Landsat snapshot was collected manually for each of the 29 years. We did not find suitable images for 1992 or 1998. We set the minimum number of scenes necessary to calculate the albedo trend of one individual grid cell to 50% (14 scenes) of the maximal available scenes. We used a nonparametric Mann–Kendall test (Mann, 1945; Kendall, 1948) to evaluate the confidence level of the trends (significant at the 99%, 95%, 80% level or not significant).

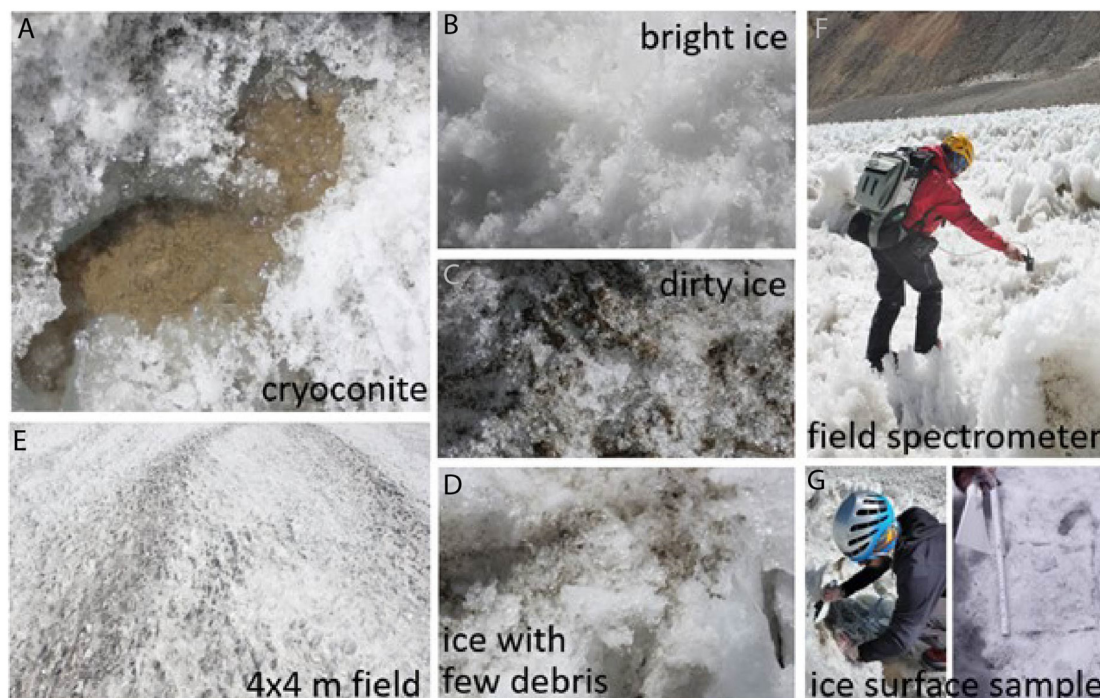


Fig. 3. A.–D. Images of measured and sampled surface types encountered on the glacier surface in Olivares catchment and E. of representative 4 by 4 m area of a sampling site with all possible surface types; example of F. In situ Fieldspec spectral reflectance measurements in Penitentes field and G. surface ice sampling.

Subseasonal glacier-wide albedo variations and winter snow albedo changes were investigated taking advantage of the higher frequency of high-quality Landsat 8 scenes available since 2013.

4.2. Field measurements: local scale

4.2.1. In situ reflectance measurements

We used a field spectrometer [analysis spectral device (ASD); FieldSpec Pro, Boulder, USA] to measure nadir in situ radiometrical properties of the different surface types. We measured a spectral range of 350–2500 nm. The FieldSpec measurements were taken under clear-sky conditions around noon between February 28, 2019 and March 3, 2019, prior to the surface sampling. The measurements procedure follows Naegeli et al. (2015), and the sites correspond to (1) the same exact location at which each visually identified surface type was sampled (field of measure 20 by 20 cm) and (2) a representative field of 4 by 4 m of the sampling site, containing all identified surface types present at the location (Fig. 3E & F).

4.3. Laboratory analysis: particle to microscopic scale

4.3.1. Organic and elemental carbon analysis

Concentrations of organic carbon (OC) and elemental carbon (EC) were determined with a thermo-optical OC-EC analyzer (Sunset Laboratory Inc., USA) using the Swiss_4S protocol for OC-EC separation (Zhang et al., 2012). Only water-insoluble OC (WIOC) can be detected using this method; we assumed the soluble part to be negligible. EC and BC are both reflecting concentrations of soot but differently denoted due to the difference in the analytical technique applied (Lavanchy et al., 1999). The surface ice samples were melted at room temperature; OC and EC were extracted by filtration and then combusted. The analysis was conducted for a sample of each visually identified surface type (Fig. 3) and with a minimum available particle material of 2.7 and 4.0 mg. Number of samples per glacier is presented in Supplementary Table A.4. Mineral dust concentration was determined subtracting the amount of organic matter (1.9 times OC, El-Zanan et al., 2005) and EC from the sample initial weight, assuming the noncombusted fraction to be composed purely of minerals. We calculated the amount of LAIs and water in g m^{-2} for each sample.

Radiocarbon (^{14}C) analysis was performed on the OC and EC samples with a 200 kV compact accelerator mass spectrometer (AMS; Mini Carbon Dating System, MICADAS) at the Laboratory for the Analysis of Radiocarbon with AMS (LARA) based in the University of Bern. For source apportionment, the obtained $F^{14}\text{C}$ was converted to the fraction of nonfossil (f_{NF}) using the following equation:

$$f_{\text{NF}} = F^{14}\text{C} / f_{\text{NF}}(\text{REF}) \quad (1)$$

Fossil carbon is characterized by $F^{14}\text{C} = 0$ due to the decay of ^{14}C with a half-life of 5730 years. The $F^{14}\text{C}$ value of contemporary carbon from biogenic sources and biomass burning $f_{\text{NF}}(\text{REF})$ was estimated using a tree-growth model. Details of the analytical methods are provided in Appendix A.2.1. Based on mass balance, the fractions contributing to OC and EC from fossil and nonfossil sources, respectively, were calculated for all our samples (Supplementary Table A.4).

4.3.2. Trace element concentration in surface samples

We analyzed trace element concentrations in the surface ice samples with inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES; VISTA AX, Agilent Technologies, Inc., USA) and performed a full digestion. Number of samples is presented in Supplementary Table A.4. The samples were melted and dried in a clean bench, put in a wolfram carbide grinding jar, and then homogenized with a vibrating mill [MM200 (Retsch)]. Per sample, 50 mg of the homogenized material was added into a 15 ml-pp tube and acidified with $\text{HNO}_3/\text{HF}/\text{HCl}$. The solution was mixed using a vortex mixer and let to react during 30 min at $\approx 95^\circ\text{C}$. The HF was masked with 5% boric acid. The end volume of each sample of the total digestion was 10 ml. Not all material of the samples could be dissolved, but the

high-resolved fine precipitates were mixed before aliquot withdrawal. These were then diluted from 1/10 to 1/1000. External calibration with a dilution series from a stock solution of a multielement standard [calibration range 0 (blank) - 2 ppm] was used.

For all samples, enrichment factors EF above the natural background were calculated for each trace element M following Tapia et al. (2018) to identify possible anthropogenic pollution through external sources as follows:

$$EF = \frac{M_{\text{sample}} / R_{\text{sample}}}{M_{\text{background}} / R_{\text{background}}} \quad (2)$$

We used background values provided by Oliveros et al. (2007) for northern Chile and Al as reference element R . EF s below 1 indicate natural occurrence; EF s between 1 and 10, possible natural and anthropogenic contribution; and EF s higher than 10, clear anthropogenic pollution.

4.3.3. Ice core - chemical analysis and dating

For the analysis of trace elements (TE), BC, and major ions, individual samples were cut from the inner uncontaminated part of the core under clean conditions in the cold room at -20°C using a stainless-steel band saw with a Teflon coated saw guide and table surface. The continuous sampling was performed with a resolution of 5 cm, and samples (≈ 15 ml each) were stored frozen in precleaned 50 ml polypropylene vials, awaiting analysis. A lower, but still continuous, sampling resolution of around 40 cm was applied for the larger volume ^{210}Pb samples (around 200 ml), which were stored frozen in clean PETG containers. Details of the analytical methods are provided in Appendix A.2.2. Concentrations of trace elements in the ice core were analyzed using inductively coupled plasma sector field mass spectrometry (ICP-SF-MS; Element 2, Thermo Fisher Scientific, Germany, details in Appendix A.2.2). For a full method description, also see Eichler et al. (2017) and Avak et al. (2018). Concentrations of BC - hereinafter referred to as refractory black carbon (rBC) according to the laser-based incandescence method used - were determined with a Single Particle Soot Photometer (SP2, Droplet Measurement Technologies, Inc., Boulder, USA, Appendix A.2.2). All details can be found in Osmont et al. (2018). Concentrations of major ions were analyzed by ion chromatography (Metrohm 850 Professional IC, Methrom, Switzerland, Appendix A.2.2). ^{210}Pb activity was determined continuously throughout the core, following the method described in Gaggeler et al. (1983) and Gaggeler et al. (2020) (Appendix A.2.2). Strongly elevated concentrations were observed in the upmost 0.5 m water equivalent (w.e., depth unit converted from meter by accounting for the measured density of the ice), indicating strong enrichment of impurities at the surface accumulated over several years due to postdepositional melt-related removal of the initially deposited snow/ice matrix (Appendix A.2.3). This layer was not considered in further analyses.

Dating of the Cerro Negro ice core was obtained using a multiparameter approach, with different independent dating methods (Appendix A.2.3). We estimated the year of origin of the surface layer to $\approx 1956 \pm 11$ years.

We calculated the trends of the enrichment factors of the different elements along the annual layers of the ice core profile using a nonparametric Mann-Kendall test (Mann, 1945; Kendall, 1948) to evaluate the confidence level of the trends (significant at the 95%, 90%, 80% level or not significant).

4.3.4. Bulk mineralogical composition

To obtain the quantitative mineralogical composition of the deposit, large debris particles (not wind transported) at Olivares Alfa, Paloma Norte, and Olivares Beta were powdered and analyzed with a Rigaku Ultima IV diffractometer equipped with a position sensitive detector. Diffractograms were recorded between 5°C and 70°C in step-scan mode ($0.02^\circ\text{C}/\text{step}$ and $1 \text{ min}/^\circ\text{C}$). The $\text{CuK}\alpha$ radiation was filtered with a nickel foil. Quantitative phase analysis by Rietveld refinement (Bish and Post, 1993) was performed on the recorded patterns using the PDXL2 software package (Taylor, 1991). The refined instrumental parameters are the zero shift, the sample displacement, and the peak shape, modeled with a

pseudo-Voigt profile function. The structure parameters for the phases present in the sample were taken from the ICDD data base. The sample parameters, which were refined, were the unit cell parameters, the isotropic overall temperature factor, the fraction of each phase present (through the scale factor), and for the phyllosilicates as well as albite, the preferred orientation parameters using the March-Dollase formalism. The atomic positions and the site occupancies were kept fixed during the refinement. Iterations were performed until the refinement converged.

4.3.5. Hyperspectral imaging microscopy

We determined the reflectance spectra of LAIs in the ice samples using a hyperspectral imaging microscope (HIMS, CytoViva, Inc.). This method was developed by Dal Farra et al. (2018) and enables to capture the hemispherical directional reflectance of each class of LAI in a heterogeneous sample. HIMS allows the identification of the impurities and the characterization of their reflectance. Spectra were collected between 400 and 1000 nm with a 2.5 nm spectral resolution (Beach et al., 2015) and a spectral sampling interval of 1.2 nm. At 100× magnification, the pixel in the hyperspectral image corresponds to $\approx 129 \text{ nm} \times 129 \text{ nm}$. Number of samples is presented in Supplementary Table A.4. In addition to the surface samples, three samples from the ice core at Cerro Negro were analyzed. The sampling procedure follows Dal Farra et al. (2018).

4.3.6. Scanning electron microscopy

After HIMS measurement, the particles were covered with a 50-nm carbon layer to enhance electric conductivity and then imaged using scanning electron microscopy (SEM; FEI Sirion FEG). Energy dispersive spectroscopy (EDS; Oxford Aztec) was used to obtain chemical maps. EDS spectra and maps of dust samples from Olivares Alfa, Beta, Paloma Norte, Juncal Sur, Cerro Negro, and Barroso IV were obtained. We also analyzed the surface and ice core samples from Cerro Negro (same sample number as measured for HIMS; Supplementary Table A.4). To eliminate the effect of topography and to obtain quantitative EDS analyses, polished sections of the particles and fragments were prepared. Element concentrations and stoichiometry of pure phases were obtained from the PAP (Pouchou and Pichoir, 1991) corrected intensities extracted from the spectra. With the high-resolved element maps obtained from the polished sections, we were able to distinguish less-abundant mineral phases. Mapping locations on the samples were chosen randomly. Different grains were mapped, and homogeneous analyses were quantified and normalized. Phase identification was based on the stoichiometry. Special attention was paid to iron-containing phases known to have low reflectance.

4.4. Numerical modeling: across scales

4.4.1. Surface mass balance sensitivity to albedo change

The goal of this modeling experiment is to quantify the change in melt and surface mass balance (SMB) rates under different distributed ice albedo values. Consequently, we assessed the sensitivity of mass balance to temporally variable distributed ice albedo. Landsat-based albedo maps from 1991, 1999, 2010, and 2018 provided distributed ice albedo information from nearly snow-free moments in time. We run the mass balance model with the same parameter set four times from hydrological years 1990/91 to 2019/20 and solely changed the ice albedo. We then related the resulting cumulative melt over a melt season with the average of the corresponding distributed ice albedo for each glacier and compared the relation among the four runs per glacier. Therefore, the changes in melt rates provide the sensitivity to the ice albedo used for modeling. In the present study, we do not attempt to identify the cause of high or low melt rates of individual years, but only show how melt rates changed in relation to changes in the observed ice albedo.

Accumulation was estimated using total precipitation obtained from the ERA5-Land reanalysis (Muñoz-Sabater et al., 2021) for each grid point

containing the assessed glaciers. Surface accumulation was assumed to be the fraction of solid precipitation (r), according to Weidemann et al. (2018):

$$r = 0.5 \cdot (-\tanh((T_{\text{air}} - 1) \cdot 3) + 1) \quad (3)$$

The proportion of solid to total precipitation is scaled between 100% and 0% within an air temperature range of 0 °C to 2 °C. Under 0 °C, the fraction of solid precipitation is 100%, while above 2 °C, the fraction of solid precipitation is 0%. An enhanced temperature-index model based on Pellicciotti et al. (2008), integrating albedo, incoming shortwave radiation, and air temperature was used to estimate melt rate:

$$M = \begin{cases} TF \cdot T + SRF \cdot (1 - \alpha) \cdot I & T_{\text{air}} > T_t \\ 0 & T_{\text{air}} \leq T_t \end{cases} \quad (4)$$

where M is melt rate (mm w.e. h^{-1}), T is air temperature (°C), α is albedo, and I is incoming shortwave radiation (W m^{-2}). TF is the temperature factor ($\text{mm d}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$); SRF is the shortwave radiation factor ($\text{m}^2 \text{ mm}^{-1} \text{ W}^{-1} \text{ h}^{-1}$); and T_t is the threshold temperature for melt onset. The empirical factors TF and SRF were assumed constant; due to the lack of direct observations of the glaciers studied in the present work, the values were those adopted from Ragetti et al. (2014) that used $TF = 0$ and $SRF = 0.0105$ for the nearby glacier Juncal Norte. Although the focus was to assess the differences between several ice albedo conditions, the T_t parameter was adjusted for each glacier to match the geodetic mass balance estimated by Hugonnet et al. (2021) during the period 2000/01–2018/19 in 5-year time steps. The resulting T_t values vary between 0 and 3 °C. The comparison shows that our modeled mass balance is in the range of the uncertainties given by Hugonnet et al. (2021) for the four analyzed glaciers and all periods (Fig. Appendix A.4). The root mean-square error of this comparison was 0.19 m w.e. for Olivares Alfa, 0.26 m w.e. for Paloma Norte, 0.15 m w.e. for Olivares Beta, and 0.12 m w.e. for Juncal Sur. These values were then assumed as the uncertainty of the model given by the choice of the parameters.

Fields of spatially distributed air temperature over each glacier surface using the SRTM at 90 m resolution were estimated with an observed catchment-scale mean lapse rate of $-8.4 \text{ } ^\circ\text{C km}^{-1}$, which was obtained by comparing the DGA (Glacier Olivares Gamma) weather station with the Valle Olivares weather station (2840 m asl) during the available common period of observations from May to November 2014. As the correction of the ERA5 air temperature was performed using off-glacier observations, a reduction of 1 °C was introduced in the distributed air temperature field to account for the cooling effect of the glacier surface over the first meters of the atmosphere, following (Ayala et al., 2016). Incoming shortwave radiation time series for each glacier were obtained from the grid point containing the glaciers and adjusted by aspect and slope using the SRTM at 90 m resolution (Fig. Appendix A.5).

Finally, spatially distributed albedo derived from largely snow-free Landsat images obtained at the end of the summer of the years 1991, 1999, 2010, and 2018 were used as input to the model. The albedo parameterization by Oerlemans and Knap (1998) was used when the glacier surface was covered by snow. This model is based on the transition of the albedo from fresh snow to firn. Results of the daily modeled albedo were compared at glacier-wide scale with those estimated using Landsat winter images for the same dates (Fig. Appendix A.6). The root-mean-square error of this comparison was around 0.06 (Juncal Sur and Olivares Beta), 0.10 (Olivares Alfa), and 0.13 (Paloma Norte). The snow albedo parameterization captures the decay of the snow albedo, but with larger uncertainties for Paloma Norte glacier. Four runs were then performed using the same meteorological data (air temperature and incoming shortwave radiation) and the same parameter set between the hydrological years 1990/91 and 2019/20. Only ice albedo information was changed. Finally, SMB was estimated using the results from the accumulation and melt quantification. A relation between albedo and melt was thereby established.

5. Results

5.1. Remote sensing observations: coarse scale

5.1.1. Spatio-temporal albedo changes

We analyzed ice and snow albedo changes, looking at each component separately, and subseasonal glacier-wide albedo change. Ice or snow albedo changes indicate the actual surface albedo change of the respective surface type snow or ice, while average glacier-wide albedo contains a mixed signal of surface albedo change of the individual surface type and of a changing surface type (from snow to ice and vice-versa). Average glacier-wide albedo can thus be used as a proxy for the glacier mass balance (Brun et al., 2015).

The negative temporal ice albedo trends from 1989 to 2018 indicated the strongest darkening of the surface area in the ablation area of Juncal Sur, followed by changes at the glacier tongues at Olivares Alfa and Beta (Fig. 4). Pixels with a significant positive trend were found on all glaciers, in particular on Paloma Norte. Affected pixels were located generally above the median glacier elevation and in rather flat terrain (Fig. 2).

Snow albedo calculated from a satellite scene at the end of winter, when the entire glacier area was still snow covered (November 9, 2014, Fig. 5), was ≈ 0.6 for all glaciers except for Paloma Norte, whose surface snow

albedo was 0.49. Snow albedo changes during the winter season of 2014–2016 and 2018 observed on Landsat 8 images clearly highlight the accelerated decrease at both Paloma Norte and Olivares Alfa (Fig. 5). While at Juncal Sur and Olivares Beta, snow albedo stayed relatively constant throughout the entire investigated winter seasons, at Paloma Norte and Olivares Alfa, the snow albedo decrease already started in late July, early August.

We investigated average glacier-wide albedo (including both snow and ice areas) from 2014 to 2018 on images of the Landsat 8 sensor. Average glacier-wide albedo is lowest at the end of the summer, when ice is exposed at the surface, indicating a high snowline position. Glacier-wide albedo at the end of the summer is similar for most years and glaciers investigated (Fig. 6). Olivares Alfa and Paloma Norte show higher winter glacier-wide albedo than Juncal Sur and Olivares Beta and reach peak albedo faster. This is because the glacier tongues of Juncal Sur and Olivares Beta reach further into the valley and take more time to be entirely snow covered, keeping the glacier-wide average albedo lower at the beginning of the winter season. Although, these glaciers, due to their size, take longer to be entirely snow free at the end of the winter season, exhibit lower mean glacier-wide albedo due to an earlier snow melt onset at lower elevations. Compared with Olivares Beta and Juncal Sur (located further away from the

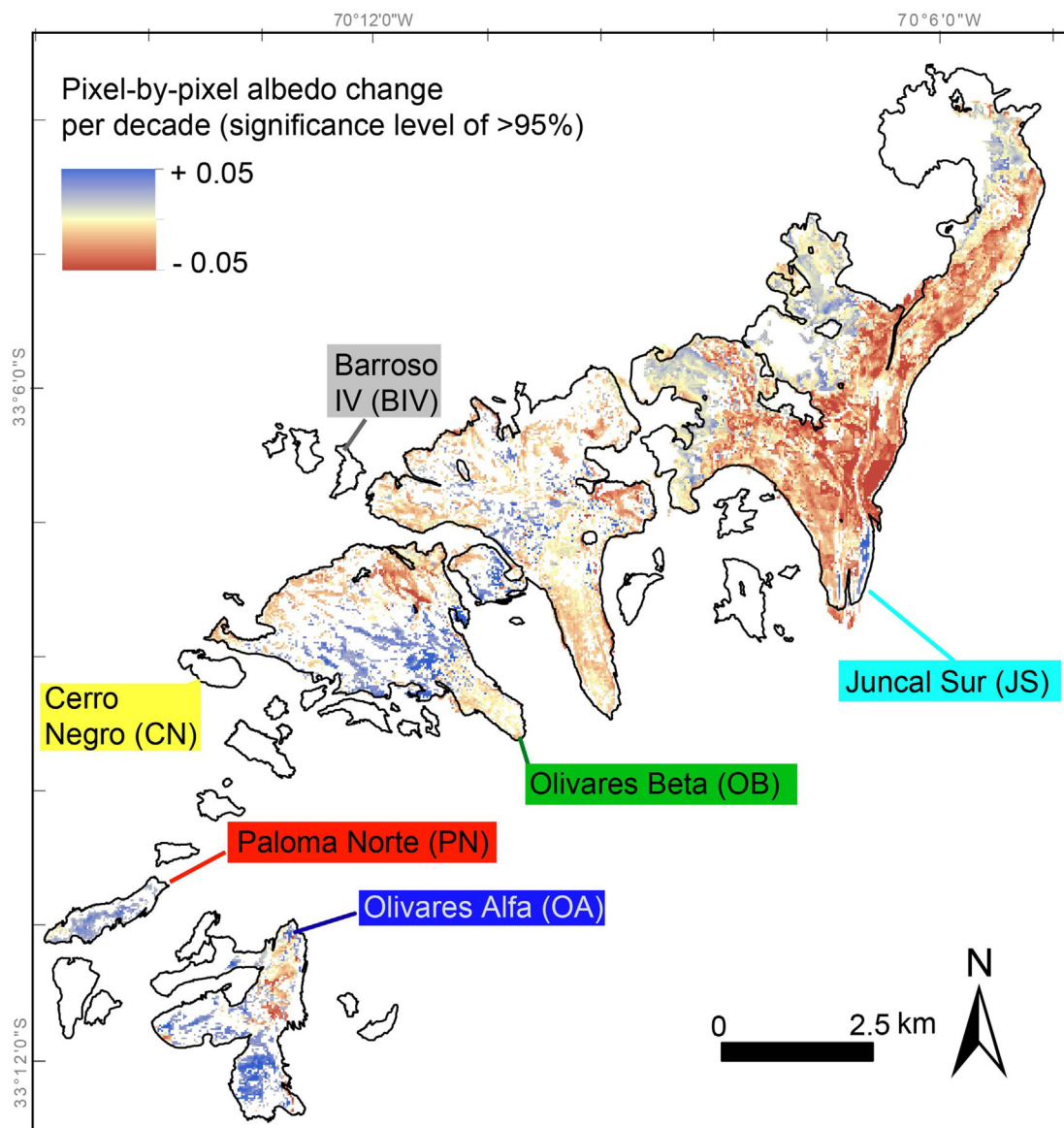


Fig. 4. Ice albedo trend of each pixel with a significant trend at 95% level or higher from 1989 to 2018.

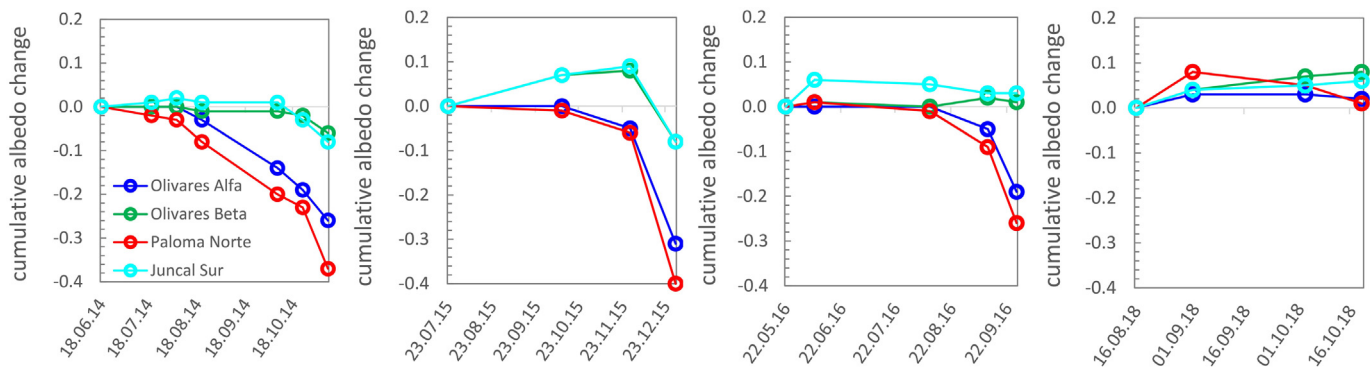


Fig. 5. Cumulative snow albedo changes for different studied glaciers during winter season (June to December) from 2014 to 2018 based on albedo maps derived from Landsat 8 surface reflectance product. Snow albedo changes summed up from one observation date to the next to calculate cumulative albedo change over the winter season. Not enough images were available for 2017.

mines), glacier-wide albedo in Paloma Norte and Olivares Alfa (located close to the mines) starts to decrease already in midwinter, despite their higher located glacier tongues and similar mean glacier elevation (Table 1). The albedo decline continues until the end of the summer. For Olivares Beta and Juncal Sur, however, the drop starts later and the glaciers maintain a higher glacier-wide surface albedo during most of spring and early summer (Fig. 6). This can be partly explained by bigger accumulation areas in Olivares Beta and Juncal Sur, varying snowpack distribution and different snow aging and dust deposition (Wiscombe and Warren, 1980; Rowe et al., 2019).

5.2. Field measurements: local scale

We used *in situ* observations to investigate the point ice albedo for the Olivares glaciers. Differences between direct (measurement fields of 4 m by 4 m) and remote sensing derived albedo (30 m pixels) are considerable due to the inherent different nature of the measurement setup (Lucht et al., 2000; Cook et al., 2017). Therefore, we analyzed these results independently. The spectral reflectance obtained from FieldSpec measurements is highest for Paloma Norte, followed by Olivares Beta (Fig. 7). Olivares Alfa shows the lowest values. However, the spread per glacier is relatively large and depends on the share of analyzed surface types contained within the field measurement and the measurement location on the glacier (Fig. 7). Measurements at the glacier tongue (PN01, PN04, OA01, OA12, OA14, J03; Fig. 2) generally show lower reflectance.

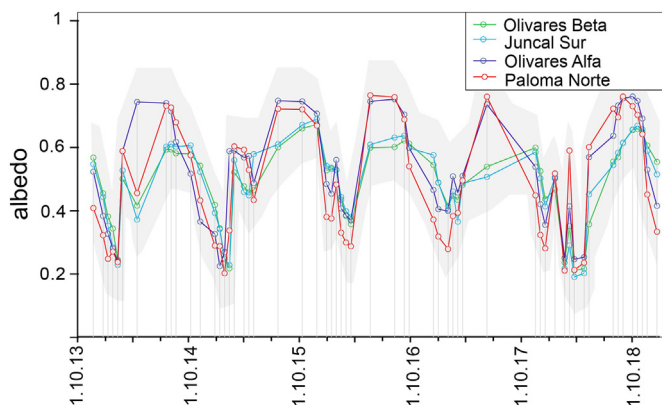


Fig. 6. Seasonal evolution of glacier-wide albedo at Olivares Alfa and Beta, Juncal Sur, and Paloma Norte from 2013 to 2018 from all available cloud-free Landsat 8 scenes. Grey lines mark all individual Landsat scenes used ($n = 58$). Shaded area indicates standard deviation of glacier-wide albedo (on average = ± 0.13).

5.3. Laboratory analysis: particle to microscopic scale

5.3.1. Characteristics of light-absorbing impurities

The surface samples analyzed contain on average 5 wt% (STD = ± 5 wt %) of LAIs and 95 wt% (STD = ± 5 wt%) H_2O in the form of snow, ice, or firn melt. Average LAIs concentration in surface samples ranges between $\approx 90 \text{ g m}^{-2}$ and $\approx 230 \text{ g m}^{-2}$ and is similar for all studied glaciers. Concentration might be affected by wash out and surface heterogeneity and does not reflect daily deposition rates. The majority of LAIs encountered on the surface of the studied glaciers in the Olivares catchment are mineral dust particles ($>99 \pm 1\%$). Samples classified as dirty ice (Fig. 3) present a LAI concentration $> 200 \text{ g m}^{-2}$; ice with few debris, between 50 g m^{-2} and 200 g m^{-2} ; and bright ice, $< 50 \text{ g m}^{-2}$. Bright ice shows a smaller OC/EC ratio, which means higher EC content compared with OC content (Fig. 3B and Fig. Appendix A.7). On average, OC concentrations are about ten times higher than EC concentrations, but both with relatively high sample-to-sample variability. Most OC in samples from Olivares Alfa, Beta, and Paloma Norte is from nonfossil sources, while the majority of EC is of fossil origin (Fig. Appendix A.7). We found a notably high concentration of fossil EC in the samples from Paloma Norte taken in 2019 (Fig. Appendix A.7). For Juncal Sur, Barroso IV, and Cerro Negro, the number of samples is insufficient to be representative (< 5).

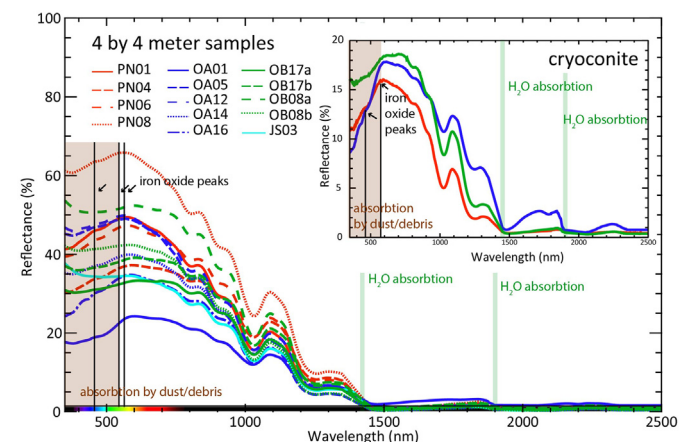


Fig. 7. Normalized spectral reflectance obtained for different measurements of fields of 4 m by 4 m and three cryoconite samples (inset) at different sampling locations of Olivares Beta, Juncal Sur, Olivares Alfa, and Paloma Norte. Brown bar indicating spectral range where effect of debris and dust absorbs most radiation. Green bars indicating absorption through organic material and liquid water. Black arrows and lines show reflectance peaks of iron-oxides (hematite/geotite; Wu et al. (2016)).

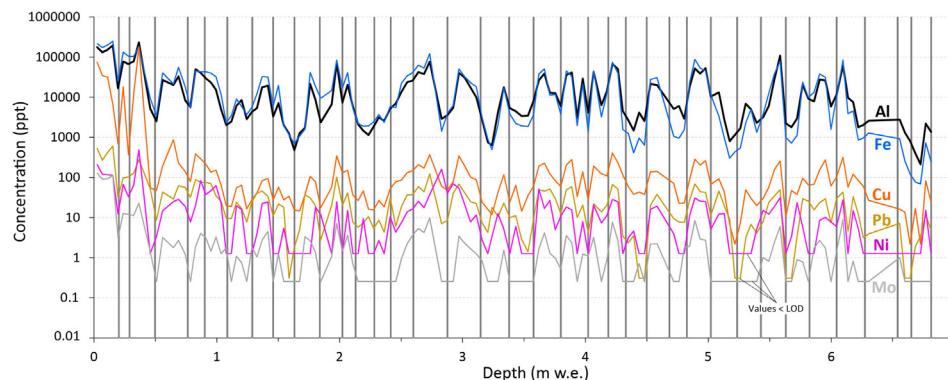


Fig. 8. Selected trace element concentration profiles from Cerro Negro ice core. Vertical grey lines indicating annual minima (meteorological winter). Values for concentrations below limit of detection replaced by value of these limits. Note logarithmic y-axis scale.

5.3.2. Enrichment of trace elements

The trace element concentration detected in the surface ice samples, containing several years of LAIs accumulation, are generally low for Juncal Sur, Barroso IV, and Olivares Beta (located further away from the mines) and high for Cerro Negro, Paloma Norte, and Olivares Alfa (located close to the mines) (Fig. Appendix A.8). Calculated enrichment factors EFs are higher than 10 for Cu, Mo, Pb, and S in the Cerro Negro, Paloma Norte, and Olivares Alfa samples, indicating nonnaturally high enrichment (Fig. 9). Ni and Co are strongly enriched for Olivares Alfa. Olivares Beta shows enriched Mo, Pb, and S. EFs for Juncal Sur and Barroso IV remain below 10 for all investigated trace elements (Fig. 9). EFs of other elements (Ba, Co, Fe, K, La, Zn, Zr) are between 1 and 10 for most glaciers. We renounce a detailed comparison between EFs of surface and EFs of ice core samples because LAIs in surface samples accumulated over an unknown period of time and thus were likely affected by different surface processes such as wash out, whereas samples from the ice core represent the trace element accumulation in the respective individual layer corresponding to a defined year. Surface concentrations are therefore used to allow for a general comparison between different glaciers in the catchment. Nevertheless, we found the same elements enriched in the ice core and surface samples of Cerro Negro (Fig. 9). Summarized for the annual layers (annual average concentrations) over the entire profile, Cu, Mo, and Pb are clearly enriched ($EFs > 10$) and Ni shows an average EFs of ≈ 5 . EF between 1 and 10 were additionally found for Ba, La, Na, Fe, and Co. Along the ice core depth profile, we analyzed element concentration (Fig. 8) and evolution of enrichment of trace elements over time (Fig. 10). The deeper the section, the older the ice and the contained impurities, with the bottom of the core estimated to contain material deposited on the surface in the mid 1920s (Appendix A.2.3). The first 50 cm contain material accumulated from around 1960 to 2017 and thus represent a multilayer concentration similar to the

surface samples altered by surface effects as described above. This uppermost part of the ice core was thus excluded from the trend analysis. We found a significant (at the 95% significance level) increasing trend of enrichment with time (towards surface) for the following elements: Fe and Co with $EFs > 1$ and Ni, Mo, and Pb with $EFs > 10$ (Fig. 10). EF of Cu did not increase significantly over time. EF of Fe and Co show an increasing trend ranging between $EF = 1$ and $EF = 10$; this indicates a potentially increasing anthropogenic contribution to the steady natural occurrence.

5.3.3. Mineral composition and spectral properties of dust particles

All samples, independently of their provenance, present similar bulk mineralogical composition. The main minerals are those found in metamorphic rocks with granitic composition (e.g., gneisses with quartz, albite, muscovite, chlorite). Rietveld refinement of the last three phases was difficult because of their variable compositions and polytypic stacking for the last two. The refinements closed with Rwp's of 5–10%.

In Fig. 11, all phases containing iron are highlighted in an element map of Paloma Norte (examples for other glaciers can be found in Fig. Appendix A.10 to Fig. Appendix A.13). Apart from different iron oxides (e.g., magnetite Fe_3O_4 and hematite Fe_2O_3), we found different iron sulfides (e.g., pyrite FeS_2 and chalcocopyrite $CuFeS_2$) (Fig. 11). The Paloma Norte samples, followed by the Olivares Alfa ones, show larger abundance and variability of iron-containing phases than those in the other samples (surface samples, Table 2). The metastable iron sulfate jarosite, the ferropotassic alunite endmember $KFe_2(SO_4)_2(OH)_6$, is present in the samples from Olivares Alfa, Paloma Norte, and Cerro Negro (Table 2). The stoichiometry is very close to the endmember. All other glacier samples do not include jarosite. We found iron sulfides (e.g., pyrite FeS_2 and Chalcocopyrite $CuFeS_2$) for Olivares Alfa, Olivares Beta, Paloma Norte, and Cerro Negro (Table 2). The samples from the ice core show lower concentrations of stable iron

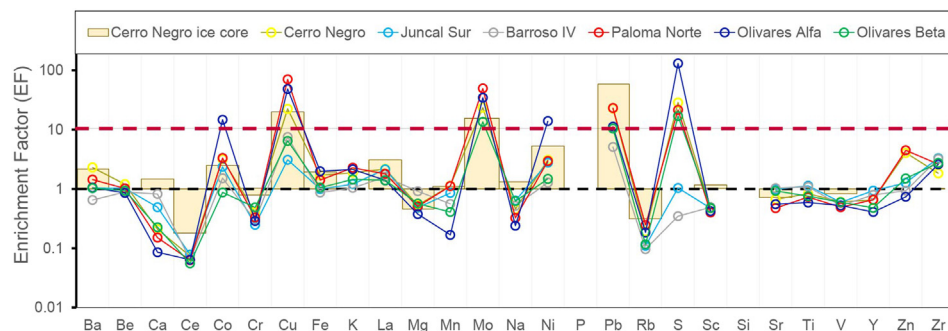


Fig. 9. Enrichment factors EF for different trace elements per glacier. Circles standing for EFs of surface samples, light yellow bars indicating average EF of ice core from Cerro Negro. Red dashed line showing EF of 10. All values above 10 likely caused by anthropogenic pollution; from 1 to 10, both natural and anthropogenic sources; below 1 (black dashed line), natural enrichment.

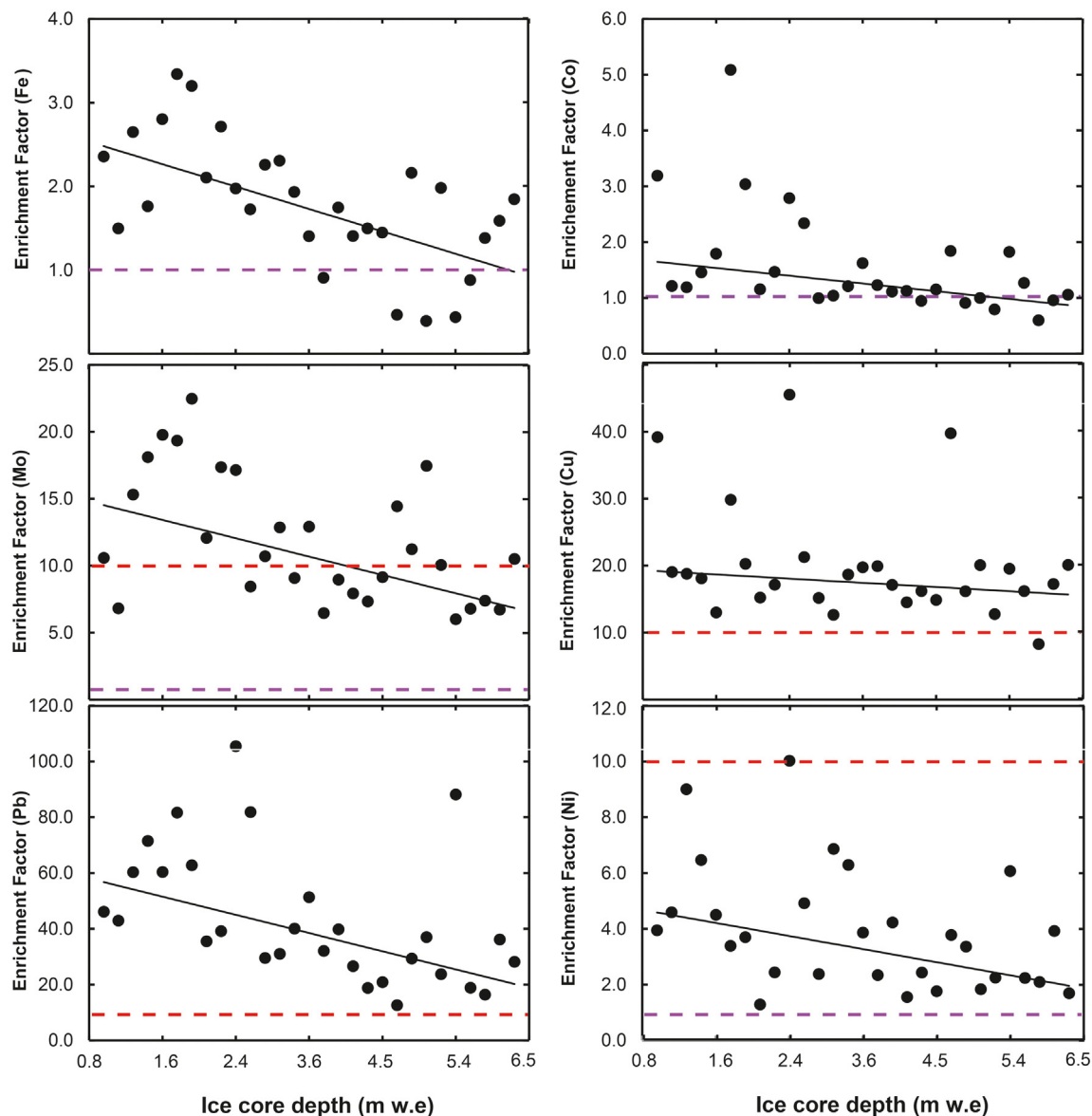


Fig. 10. Enrichment factors *EF* of each annual layer throughout ice core depth profile of selected trace elements from Cerro Negro. Uppermost 50 cm were not taken in account. The deeper the section of the core, the older the sample. Red dashed line indicating *EF* of 10 and purple dashed line, *EF* of 1.

oxides and iron sulfides in comparison with the surface samples (Table 2); however, we found higher concentrations of jarosite, especially in the deeper layers of the core (Table 2).

After analyzing the mineralogical composition, we were able to tie individual mineral grains to specific reflectance spectra at microscopic scale (Fig. 12). As expected, normalized reflectance spectra showed iron-containing minerals to have lower reflectance. Lowest reflectance values were found for iron sulfides (e.g., chalcopyrite CuFeS_2) and iron oxides, Fig. 12 and Appendix A.9).

5.4. Numerical modeling: across scales

5.4.1. Sensitivity of glacier melt to ice albedo changes

Our results show a strong linear relationship between melt and ice albedo (Fig. 13). The modeled mass balance rate agrees relatively well with the results reported by (Hugonnet et al., 2021, Fig. Appendix A.4). We found an average increase of melt sensitivity of $+0.016$ m w.e. for a change in mean ice albedo of -0.01 . This is similar to the sensitivity of $+0.014$ m w.e. per -0.01 albedo decrease encountered for the Swiss Alps (Naegeli

and Huss, 2017). The highest sensitivity was found for Paloma Norte (Table 3). Sensitivity to subseasonal snow albedo changes could not be assessed with the model used. However, we found good agreement between space-borne snow albedo changes over the winter season and a snow albedo decay parameterization by Oerlemans and Knap (1998) for all glaciers except for Paloma Norte (Fig. Appendix A.6). The sensitivity study clearly revealed the relation between glacier mass balance, corresponding melt rates, and surface albedo. This also revealed an increased mass balance sensitivity to a change in albedo for Paloma Norte and Olivares Alfa.

6. Discussion

6.1. Importance of mineral dust deposition on the glacier surface albedo

For all glaciers in the Olivares catchment, a considerable amount of LAIs ($\approx 70 \text{ g m}^{-2}$ to $\approx 200 \text{ g m}^{-2}$) was detected. Yala Glacier in the Himalayas and Urumqi and July 1st Glacier in China ($>200 \text{ g m}^{-2}$) present high dust concentrations (Takeuchi and Li, 2008), exceeding some of the LAI content

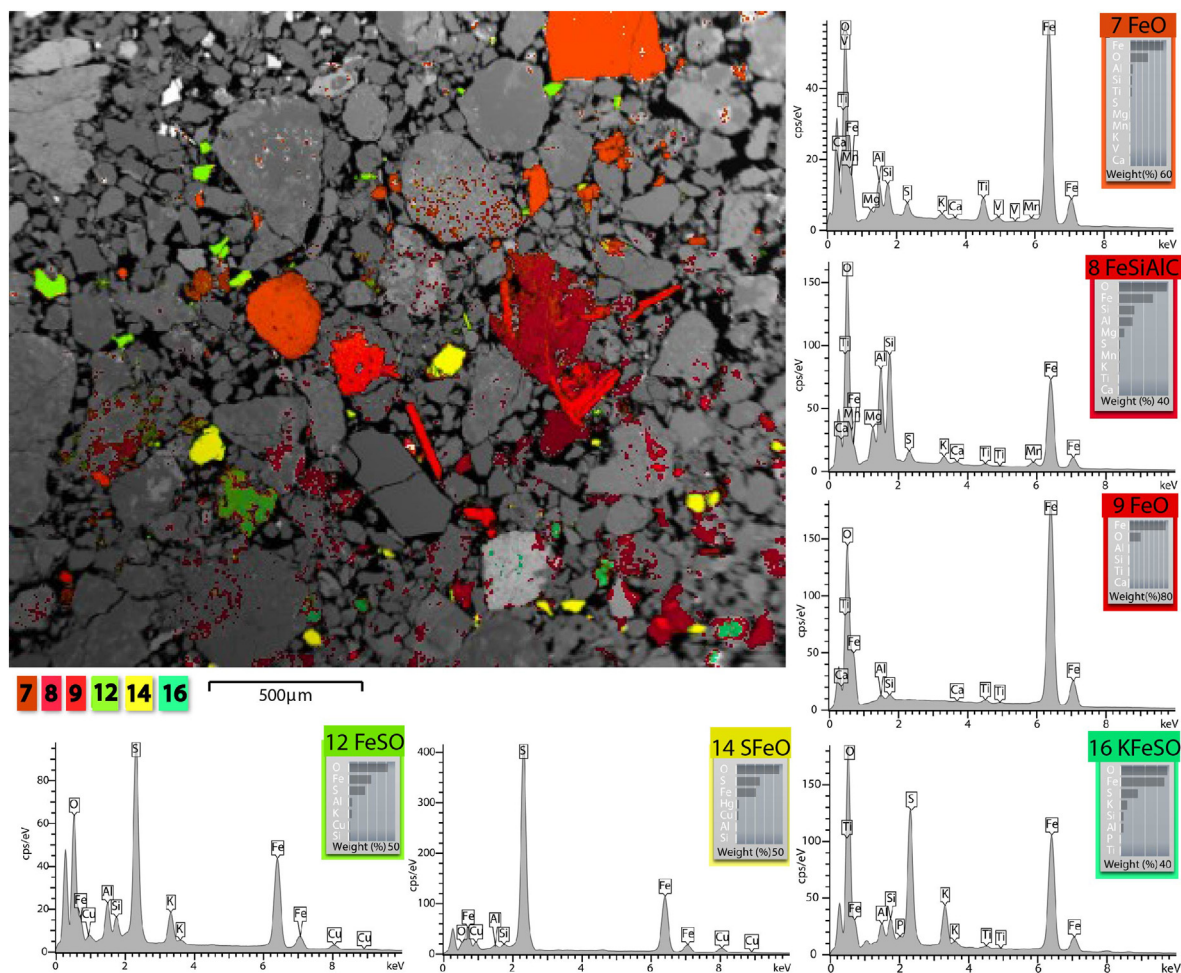


Fig. 11. Backscatter image of a polished section of Paloma Norte. The colors highlight element groups found in different fragments consisting of several phases. Element concentration extracted from each spectrum shown in the bar diagram insets. All fragments contain silicates (feldspars, phyllosilicates). Fragments corresponding to spectra 7–9 contain iron oxide/hydroxide as main phases (hematite, magnetite, or one of the (oxi)hydroxides), spectra 9 correspond to an almost pure iron oxide/hydroxide grain, spectrum 14 correspond to an almost pure iron sulfide (pyrite) (green and yellow: spectra 12, 14). The composition of the phase giving the spectrum 16 corresponds to the stoichiometry of jarosite. Examples for other glaciers shown in Appendix A.3.

found in the present work. Akkem Glacier in the Altay presents a similar amount of LAIs but higher OC concentrations than the glaciers studied in the present work (Takeuchi and Li, 2008). Despite the low reflectance of OC and BC (or EC) particles, their effect on albedo is reduced in the presence of a large quantity of high-absorbing mineral dust particles (Di Mauro et al., 2015; Kaspari et al., 2014) that capture part of the solar radiation that OC and BC would receive in the absence of mineral dust (Kaspari et al., 2011). Therefore, for environments in which mineral dust dominates LAI, mineral dust also dominates absorption, snow albedo reduction, and radiative forcing in snow (Di Mauro et al., 2015; Kaspari et al., 2014). This is relevant in particular for glaciers in the region studied in the present work, where most deposited LAIs are mineral dust particles ($\approx 99\%$). We found that high-light-absorbing mineral dust particles are the most important LAIs controlling glacier surface albedo in the Olivares catchment.

6.2. Small-scale effect of LAIs on surface reflectance

Presence of debris and dust lowers reflectance in the lower spectral bands (<600 nm, Wiscombe and Warren, 1980) and is apparent through the strong absorption of solar radiation in the visible wavelength region for samples classified as dirty ice, ice with few debris, and cryoconites (Fig. 7). This reduction is less strong for the spectra of bright ice and more pronounced on Olivares Alfa and Paloma Norte. Highest reflectance corresponds to the bright ice class, which mostly corresponds to samples

of the upper most layer of the weathering or refreezing crust. Formation of water ponds and cryoconite holes were observed below the weathering crust during the field visits. The effect of this near-surface material on the observed albedo, however, remains unexplained. At lower wavelengths, over 60% of solar radiation is reflected by the bright ice class. This is comparable to fresh snow, with a reflectance of up to 70% (Naegeli et al., 2017). Measurement of liquid water ponds and streams at the glacier surface show low reflectance, especially at higher wavelength (>800 nm), and can absorb up to 90% of solar radiation (Paul et al., 2005; Naegeli et al., 2015). Liquid water at the surface is more frequent below the snowline. We found iron oxide/hydroxide peaks in the reflectance spectra [at 430 nm and 535 (goethite) 555–575 nm (hematite), Wu et al., 2016], especially pronounced for the cryoconite (Fig. 4) and dirty ice samples from Olivares Alfa and Paloma Norte. Surface reflectance spectra obtained from Paloma Norte and the glacier tongue samples from Olivares Alfa show peaks indexed for iron oxide/hydroxide phases, whereas those obtained from Olivares Beta lack these peaks (Fig. 4). Wu et al. (2016) reports that the intensity of these peaks correlates with the quantity of the corresponding phases present. This together with the EDS elemental maps of the same samples suggest a higher iron-oxide/hydroxide content in LAIs for Olivares Alfa and Paloma Norte than for Olivares Beta; more importantly, this highlights the strong effect of minor LAIs components (iron oxides/hydroxides) on the measured surface ice reflectance spectra and consequently on the surface albedo of the glaciers at very small scale.

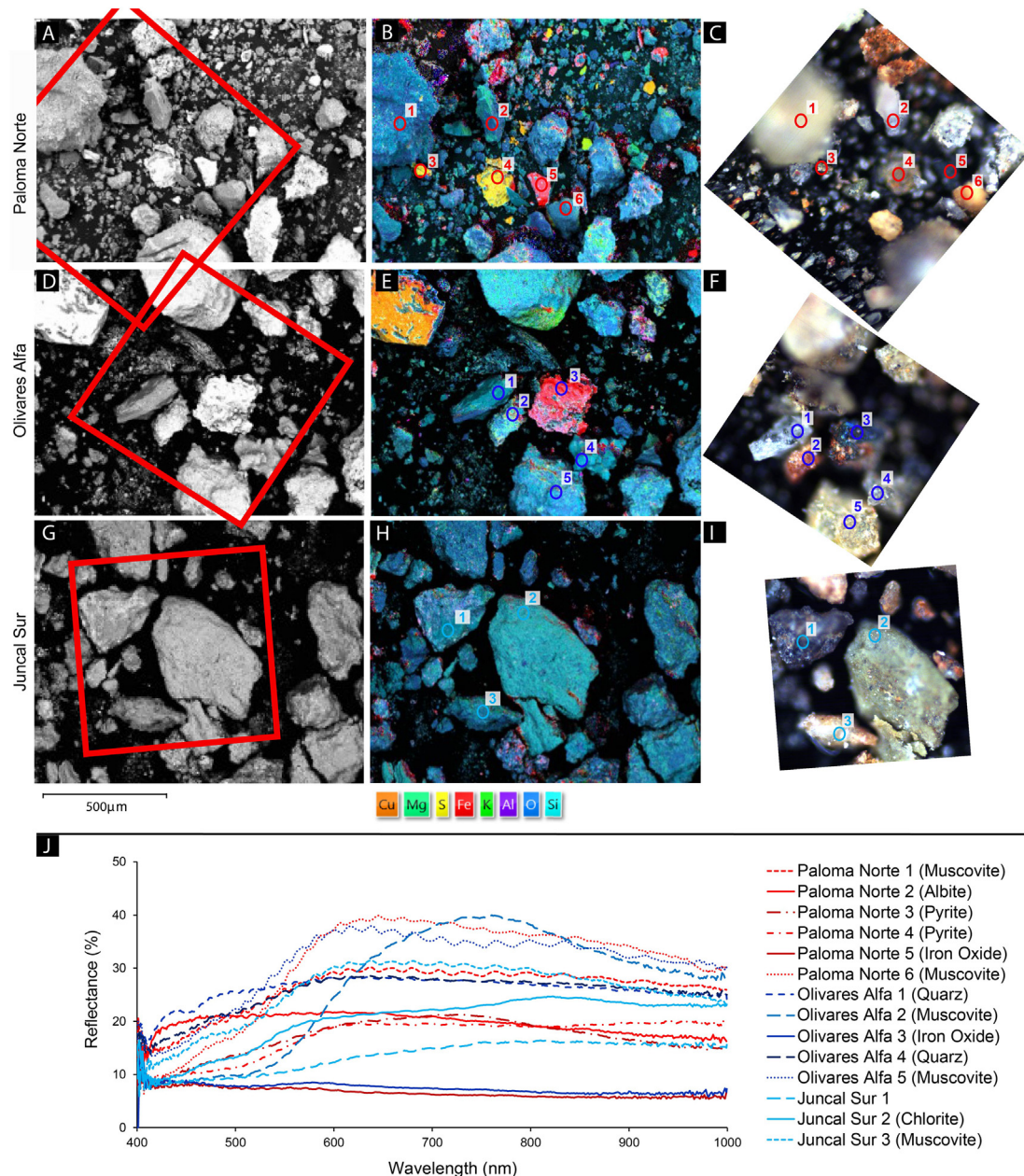


Fig. 12. Backscatter (BSE) and HIMS images of same areas of Paloma Norte A, Olivares Alfa D, and Juncal Sur G samples; the brighter the BSE images the higher the average atomic number of the phase(s). B, E and H show elemental maps for the same sample. Different elements coded by colors overlay (Cu = orange, Magnesium (Mg) = green, S = yellow, Fe = red, K = light green, Aluminium (Al) = purple, Oxygen (O) = blue, Silicon (Si) = light blue). C, F, and I corresponding HIMS images. Circles with numbers indicating location of retrieval of normalized reflectance spectra shown in J.

6.3. The role of surface albedo change and glacier melt

Region- and glacier-wide end-of-summer albedo are in line with Shaw et al. (2021); detected changes are also similar to those in Peña and Olmedo (2019). Averaged ice albedo trends calculated below the snowline in Shaw et al. (2020) are based on a relatively small fraction of the total glacier area (5–30%), whereas in the present study, we report pixel-based trends. We did not average those trends over the entire glacier area due to unequal spatial coverage and distribution of the identified trends. Furthermore, average trends contain more information, mixing different processes into the signal, and thus hamper a process-oriented interpretation of the surface change signal (Naegeli et al., 2019). We found a darkening over the glacier tongues (Fig. 7) that is a result of changes in surface

roughness (i.e., penitentes), different sources of dust deposition (Azzoni et al., 2014; Di Mauro et al., 2016; Di Mauro, 2020), development of cryoconite holes (Takeuchi et al., 2001; Cook et al., 2016), presence of water, and surface melt-out of particles incorporated in the deeper ice layers (Gomez and Small, 1985).

The encountered ice albedo trends at higher glacier elevation are complex and more heterogeneous (Fig. 7). We found positive trends for pixels just above the glacier snout for Paloma Norte, and starting from around the mean elevation upwards for Olivares Beta, Alfa, and Juncal Sur. These areas are all relatively flat, and processes such as sublimation, refreezing, and weathering crust formation may play a crucial role on the surface reflectance properties observed from space. Tedstone et al. (2020) found a strong impact of the state of the weathering crusts (i.e., density and

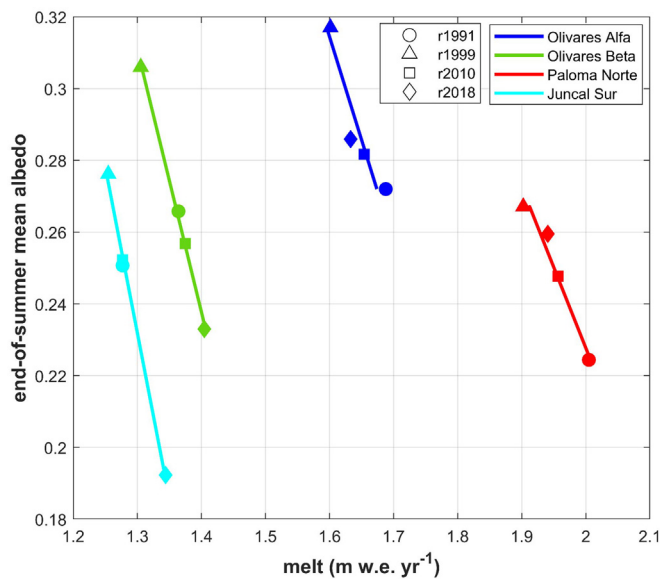


Fig. 13. Relationship between annual melt rates and mean end-of-summer glacier-wide albedo for different glaciers in study area.

porosity, interstitial, and ponded water content) on the surface albedo. Weathering crusts are more favorable to form on flat surfaces, under shortwave-dominant energy conditions and very low wind speeds, and are highly variable in space and time. Ayala et al. (2017) demonstrated the importance of wind speed to explain the spatial heterogeneity of melt and sublimation over the area of Juncal Norte. Measurements published in Codelco Chile (2019) highlight lower wind speeds on glacier than off glacier, especially from December to February. The measurement locations coincide with the locations of positive albedo change and demonstrate favorable conditions for surface crust formation. Schaefer et al. (2020) highlights the dominance of the incoming solar radiation in comparison with the other heat flux components for Bello glacier (located close by in the Colorado catchment). Increasing temperature and decreasing precipitation under the 10-year-long mega drought (Garreaud et al., 2020) could have produced a reduction of water vapor in the atmosphere. The missing water vapor, on the one hand, creates a stronger water-vapor gradient, enhancing sublimation and increasing penitentes growth and surface roughness; on the other hand, results in a diminution of the absorbed shortwave radiation in the atmosphere. A possible increase of incoming

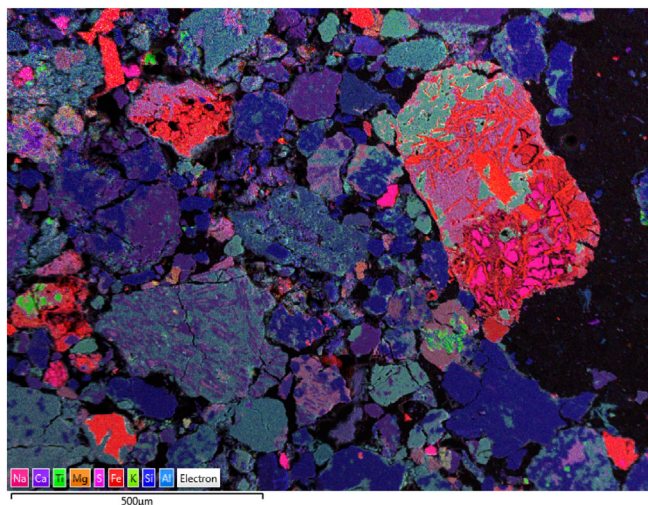


Fig. 14. EDS map of Paloma Norte sample showing rock particles with breccias typical texture.

Table 2

Percentage of iron-containing elements in the analyzed element maps classified into iron oxides, iron sulfides, and metastable iron sulfates jarosite for the different surface and ice core samples. The percentages represent the summarized abundance of all analyzed snapshots of each individual sample.

Sample location	Iron oxides	Iron sulfides	Jarosite
Paloma Norte	5.0%	1.0%	0.7%
Olivares Alfa	1–2%	1.5%	2.5%
Olivares Beta	1–2%	1.0%	–
Juncal Sur	1–2%	–	–
Barroso IV	1–2%	–	–
Cerro Negro _{surface2019}	5.5%	2.3%	0.3%
Cerro Negro _{1961–2017}	2.2%	1.7%	0.2%
Cerro Negro ₁₉₄₅	2.7%	1.7%	1.5%
Cerro Negro ₁₉₃₇	2.0%	1.8%	1.8%

solar radiation that penetrates the ice surface and the rime accretion at the surface, accelerated by cloud cover changes, could enhance melt within the upper ice layer. However, assessing those processes in detail lies beyond the scope of the present study. More effort is needed to reveal the processes behind the observed spatially heterogeneous albedo changes.

Enhanced subsurface melt in combination with low wind speed could favor weathering crust formation, characterized by high surface reflectance (reflectance spectra of bright ice). The development of a weathering crust enables LAIs to exert more control upon albedo, both directly and by modifying the optical parameters of the underlying ice surface via enhanced melt at patch scales (Tedstone et al., 2020). The increasing reflectance trends detected on satellite-based albedo maps, with a relatively low spatial resolution, show that such underlying small-scale effects remain undetected on larger scale assessments (Abermann et al., 2014). In situ surface reflectance measurements are therefore more suitable to disentangle the effect and interplay of different surface characteristics at smaller scale; however, time series of meaningful length are generally missing, and sample size is often not representative for the total glacier area. On microscopic level, we report that different LAIs compositions (i.e., increased deposition of iron-containing minerals) found for Paloma Norte and, to some degree, for Olivares Alfa lower the albedo of the samples. Quantifying these effects is difficult. The difficult scalability of the observed processes controlling surface albedo increasingly complicates the prediction of albedo changes and their effect on glacier mass balance in detail. The applied model cannot represent such small-scale spatio-temporal variability, and their influence on glacier melt remains unknown. Nevertheless, the use of spatially distributed albedo maps as input for modeling provides more detail of the enhanced albedo feedback that will be amplified due to atmospheric warming in the future (Abermann et al., 2014; Naegeli and Huss, 2017). A constant albedo value used for modeling can lead, especially at the glacier tongue, to a strong underestimation of melt rates (Naegeli and Huss, 2017).

6.4. The importance of snow albedo

The effect on glacier mass balance of the observed lower glacier-wide albedo at Juncal Sur and Olivares Beta during winter might be negligible. More important is the timing of the minimum glacier-wide albedo and its absolute value during summer time, principally governed by ice area extent. The accelerated seasonal glacier-wide albedo change for Paloma Norte and, to some extent, for Olivares Alfa is thus crucial (Fig. 6). This is a combination of faster snow depletion, LAIs deposition and snow aging, causing a feedback which leads to longer ablation seasons and, therefore, accelerated melt. We suggest that the earlier lowering of the surface albedo at Paloma Norte and Olivares Alfa explains an important part of the above-average mass loss over the past two decades reported in Dussaillant et al. (2019) and in Fariás-Barahona et al. (2020).

The average snow albedo observed on satellite images at the end of different winters is very low, especially for Paloma Norte. Our modeling study suggests that the albedo decay parameterization failed to represent the seasonal snow albedo decrease at Paloma Norte, suggesting an additional

Table 3

Modeled mean annual surface mass balance ($SMB_{thisstudy}$) from 2000 to 2020 in comparison with observed geodetic mass balance $\Delta M_{2000-2018}$ in Dussailant et al. (2019), $\Delta M_{2000-2013}$ in Farías-Barahona et al. (2020), and $\Delta M_{2000-2020}$ in Hugonnet et al. (2021). Also given: mass balance sensitivity to albedo α lowering of 0.01 (last column).

Glacier	$SMB_{thisstudy}$ (m w.e. yr ⁻¹)	$\Delta M_{2000-2018}$ (m w.e. yr ⁻¹)	$\Delta M_{2000-2013}$ (m w.e. yr ⁻¹)	$\Delta M_{2000-2020}$ (m w.e. yr ⁻¹)	Change in melt (m w.e. $-0.01\Delta\alpha^{-1}$)
Juncal Sur	-0.30 ± 0.12	-0.27 ± 0.03	-0.26 ± 0.11	-0.29 ± 0.11	+0.011
Olivares Beta	-0.51 ± 0.15	-0.43 ± 0.05	-0.24 ± 0.11	-0.54 ± 0.11	+0.014
Olivares Alfa	-0.72 ± 0.19	-0.85 ± 0.09	-0.88 ± 0.11	-0.83 ± 0.15	+0.017
Paloma Norte	-1.05 ± 0.26	-0.97 ± 0.11		-1.06 ± 0.22	+0.022

source for albedo decay, such as enhanced LAI deposition. We observed a strong albedo reduction at the northern flank of the glacier tongue, close to the location of PN04 (Fig. 2). Field spectrometer measurement at PN04 showed the lowest reflectance reported for the ice samples for Paloma Norte (Fig. 7). Thus, the observed early snow albedo reduction might relate to a localized increase of LAI deposition. Sources of mineral dust are eroding rocks (including water and ice as erosion agents) or wind-transported material. Larger debris fragments can only reach the actual location through gravitational transport onto the glacier surface. Smaller particles (aerosol <100 μm in size), however, can be transported by wind. In the ice surface samples at Paloma Norte, we found strongly light-absorbing rock particles with a texture typical for breccias found in the pipes exploited by the mines (Fig. 14) and jarosite particles. Due to the topographic and geological setting, these particles are not expected to be mobilized or produced through erosion and deposited on the glacier surface through natural processes. Jarosite can only form and survive in the mine tailings; breccia outcrops are only present topographically below the studied glacier, in the mining area. Both can reach the northeastern part of Paloma Norte only through wind transport from the mine tailings. Measurements of wind direction show that ascending winds over the mining area reach the northeastern flank of Paloma Norte (Fig. 2, Codelco Chile, 2019). Codelco Chile (2019) also reports winds from this direction to be strongest during autumn and winter. However, these winds are weak at the northeastern part of the glacier, where descending winds from the southwest are stronger. The descending winds from southeast to northwest dominate the entire glacier during spring and summer (Codelco Chile, 2019). For Olivares Alfa, measurements show that the ascending winds over the mine area reach the glacier tongue from the north and propagate upwards to the accumulation area, where they weaken (Codelco Chile, 2019). Measurements of wind-direction-dependent aerosol transport at Olivares Alfa (from Dirección General de Aguas) from October 21 to October 29, 2014 recorded a strong increase of the two particular matter (PM) classes with aerodynamic diameters not larger than 2.5 μm (PM_{2.5}) and 10.0 μm (PM₁₀) for wind directions from northwest to southeast. These findings support our results and suggest that particles mobilized from the loose dust deposits of the mine tailings could reach the tongue of Paloma Norte and the ablation area of Olivares Alfa, especially during the winter season, and might produce an important seasonal snow albedo reduction during the winter months for the two sites.

6.5. Evidence of anthropogenic pollution

Iron oxides, hydroxides, sulfides, and sulfates are efficient light-scattering and light-absorbing materials, which can enhance absorption at ultra violet and visible wavelengths (Zhang et al., 2015). Small-scale variability of the surface albedo may be due to different iron oxide and sulfide content in the dust particles. The percentage of iron-containing minerals in the element maps based on SEM measurements are somewhat lower for Juncal Sur and Barroso IV, similar for Olivares Beta, but considerably higher for Olivares Alfa, Paloma Norte, and Cerro Negro (up to $\approx 8\%$, Table 2). Wu et al. (2016) found values reaching 4.32% of iron content in LAIs in firm cores from different glaciers in High Asia; Shi et al. (2011) reported values up to 5.7%. The here encountered iron concentration in the surface samples is approximately 1.5 times higher for Paloma Norte, Cerro Negro, and Olivares Alfa than for Barroso IV, Olivares Beta, and Juncal Sur. The first three lie within the range of the values encountered

for the Coastal Cordillera of northern Chile ($\approx 6.0\%$, Oliveros et al., 2007), while the latter three have substantially lower iron concentrations. Material from the pyrite-containing hydrothermal alteration zones (Section 2.2 and Appendix A.1.1) can reach Paloma Norte, Olivares Alfa, and Beta by gravitation, water and ice transport, and wind transport. This might partly explain the higher iron concentration in the surface samples in comparison with Juncal Sur and Olivares Beta. However, iron concentrations increased over time at Cerro Negro, and the calculated *EF* shows a significant positive trend at a 99% level. *EF* of deeper ice core samples suggests natural occurrence. The more recent layers (closer to the surface) suggest some anthropogenic influence on the iron concentration (*EF*: 1 to 10, Fig. 10).

Along the variable iron concentration, enriched trace elements suggest an anthropogenic influence (Cu, Pb, Mo, La, and Ni). Cereceda-Balic et al. (2012) identified traffic, smelting, biomass, coal burning, and waste incineration as sources for enriched trace elements in snow at the nearby Cerro Colorado. Our study shows that the enrichment of these trace elements has increased since the 1920s. The contrast between the enrichment factors of the sample sites located at close proximity to the mining area (Paloma Norte, Olivares Alfa, and Cerro Negro) and those from the glaciers situated further away from the mines (Juncal Sur, Barroso IV, and Olivares Beta) is striking. Alfonso et al. (2019) found significant anthropogenic enrichment of copper and molybdenum in samples at a distance of about 15 km to the copper mines Los Bronces and Andina. Our results accredit anthropogenic enrichment of the same elements at Olivares Alfa and Paloma Norte (*EF* > 50).

We found jarosite at Olivares Alfa, Paloma Norte, and in the samples from Cerro Negro (Table 2). Dold and Fontboté (2001) found jarosite in the mine tailings. Material from these tailings can only be transported to the glaciers by wind and cannot form at the natural environment of the Olivares catchment. Thus, jarosite must have been transported in the form of aerosol from these tailing sites onto the glacier surfaces, as it cannot form in situ because the pH of melt water from the glacier is too high. Jarosite is metastable and decomposes in the presence of humidity/liquid water to iron hydroxide. Its presence in the Cerro Negro core suggests burying of the jarosite with snow in the accumulation area at the ice core drill site (Table 2).

More evidence of the transport of aerosols from the mine tailings onto the glacier surface is the higher fossil EC concentration at Paloma Norte compared with Olivares Alfa samples (Fig. Appendix A.7) and the breccia particles (Fig. 14).

6.6. Limitations

A major limitation of the present study is the representativeness of our results; so is tying them across scales. Sample sites are distributed over the glacier area but restricted to well accessible sites. The different chemical and mineralogical analyses of those samples are labor and cost intensive and were thus limited to a selection only.

In situ reflectance measurements for a field of 4×4 m are not straightforward for a penitentes-dominated glacier surface; consequently, our measurements tended to be taken on flatter ground. Surface type classification is based on expert knowledge. To compare albedo derived from Landsat satellite images with direct field observations is difficult due to different measured spectral ranges and spatial resolution (Naegeli et al., 2017). Weathering crust formation, sublimation, refreezing, and thaw-freeze

cycles are diurnal processes that cause temporal variability of the surface albedo; these processes could not be captured with the data used in this study. Similarly, the effect of the reduction of reflectance intensity of mineral grains is difficult to quantify on glacier scale; so is to quantitatively link satellite-based observations with small-scale albedo variations.

Our results highlight anthropogenic LAIs sources and modification of their composition, concentration, and distribution; however, quantifying the amount of natural and anthropogenic mineral dust loads mobilized and deposited on the glacier surface remains a challenge. The mining waste deposits provide a source for various minerals that can be wind-transported apart from the particles that we identified as mobilized and originated in the mine area (jarosite, breccia). In the present work, we were not able to separate pure nonmining-affected dust mobilization nor quantify the effect of LAIs deposition originating from the mining area on the glacier-wide mass balance. Our evidence of mining residuals on the glaciers is based on the chemical and mineralogical compositions of dust particles collected on the glacier surface and in the ice core, rather than on a back trajectory analysis. Such analysis, in combination with wind-directed aerosol measurements, could provide important insights into the wind redistribution patterns of LAIs and facilitate the quantification of the actual amount of anthropogenic LAIs deposited on the glaciers in the region.

The model used in the present study delivers a first, strongly parameterized (e.g., constant lapse rates) estimate and is not able to reflect all relevant physical processes, such as sublimation, snow aging, formation of penitentes, or diurnal variations. The model uses distributed ice albedo from satellite scenes. This can better represent the spatio-temporal heterogeneity of glacier mass balance - albedo interaction compared with conventional modeling using a constant albedo values for snow, firn, and ice (Naegeli and Huss, 2017). However, it remains restricted to annual albedo heterogeneity on a pixel size of 30 m. Smaller scale heterogeneity is thus not represented. Furthermore, the snow albedo decrease is based on a strongly parameterized scheme. The choice of the model responds to a lack of available model input data. Nevertheless, we believe our approach provides a valuable first-order estimate of surface melt sensitivity to glacier ice albedo changes because we used distributed ice albedo maps. The modeling approach cannot reveal the detailed underlying processes. Future studies need to include not only distributed ice albedo but also snow albedo variations throughout the accumulation season and a more physical-based mass balance model.

7. Conclusion

Up to 99% of LAIs collected in the Olivares catchment are mineral dust particles. Iron-containing particles lower the glacier surface reflectance and are more frequent on the glacier surface at Olivares Alfa and Paloma Norte. Minor LAIs components (iron oxides/hydroxides) have a strong effect on the surface reflectance properties of the glaciers. Trace elements are significantly enriched at the surface of Olivares Alfa, Paloma Norte, and Cerro Negro (closest to the mines) compared with the natural occurrence found at Juncal Sur and Barroso IV (further from the mines). An increase in enrichment factors is apparent at the Cerro Negro ice core location since the 1920s. Large-scale assessment from satellite-based observations reveals ice albedo lowering (darkening) at most glacier tongues from 1989 to 2018. However, pixel-based albedo trends are heterogeneous, especially above the median glacier elevation. This might relate to increased formation of weathering crusts at the ice surfaces because of changes in atmospheric conditions related to the mega drought. Glacier melt, in particular for Paloma Norte, is very sensitivity to ice albedo changes. However, differences in ice albedo alone cannot explain the above-average mass loss observed at Paloma Norte and Olivares Alfa. Surface dust depositions influence winter snow albedo decrease, prolonging the exposure of low-reflective ice areas. This can explain the above-average mass loss balances found in the catchment. However, we were not able to model the observed snow albedo decay with our modeling approach. Our results suggest that mechanisms and feedbacks other than the mega drought (Garreaud et al., 2017) are driving the above-average negative glacier mass balance of

Paloma Norte and Olivares Alfa (glaciers close to the mines). These processes change surface characteristics such as LAIs distribution pattern, changing snow and ice albedo and their evolution over time, from very small to regional scale. Some processes responsible for changing the surface characteristics of the glaciers have a natural origin, such as land cover degradation exposing soil to erosion and intensive dust particle mobilization (e.g. Shepherd et al., 2016; Al Ameri et al., 2019). Others have an anthropogenic origin or relate to anthropogenic activities and are linked to mining activities in the Andina and Los Bronces mines. This anthropogenic influence includes the enrichment of trace elements and the increased dust mobilization and deposition on the glacier surface due to the mobilization of loose material from the nearby mine tailing. However, we were not able to provide quantitative estimates of the glacier-wide contribution from either natural or anthropogenic LAIs sources.

We present clear evidence of mineral particles mobilized by mining activities having been transported and deposited on the glaciers surface: (1) jarosite formed only in the mine tailings and (2) particles with breccia typical structure found at the glacier surface. Those particles have been transported from the mining area in agreement with the dominant wind patterns and aerosol monitoring. We conclude that the nearby copper mines provide a source for LAIs deposited at the glacier surface. Mass balance and associated melt volumes are sensitive to ice albedo. The effect of LAIs on surface albedo and the sensitivity of glacier mass balance to changes therein are highly complex and strongly analysis-scale dependent.

CRedit authorship contribution statement

M. Barandun: Conceptualization; Data curation; Formal analysis; Investigation; Methodology; Validation; Visualization; Roles/Writing – original draft.

C. Bravo: Data curation; Formal analysis; Methodology; Visualization; Writing – review & editing.

B. Grobety: Formal analysis; Methodology; Supervision; Writing – review & editing.

T. Jenk: Data curation; Formal analysis; Investigation; Methodology; Visualization; Writing – review & editing.

L. Fang: Data curation; Formal analysis; Investigation; Methodology; Writing – review & editing.

K. Naegeli: Methodology; Writing – review & editing.

A. Rivera: Conceptualization; Funding acquisition; Supervision; Writing – review & editing.

S. Cisternas: Data curation; Writing – review & editing.

T. Münster: Data curation; Formal analysis.

M. Schwikowski: Conceptualization; Funding acquisition; Supervision; Writing – review & editing.

Declaration of competing interest

We do not have any conflict of interest.

Acknowledgements

We thank S. Koechli for performing the sample preparation and the ICP-OES measurements; D. Farias for the geodetic mass balance and elevation change data at Cerro Negro to deduce surface change for the location of the drill site. This research has been funded with a fellowship from the Glaciología y Cambio Climático Centro de Estudios Científicos (CECs) Valdivia Chile. We thank T. Saks for advice on geological data interpretation. We thank the two anonymous reviewers for their constructive comments.

Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155068>.

References

- Abermann, J., Kinnard, C., MacDONELL, S., 2014. Albedo variations and the impact of clouds on glaciers in the Chilean semi-arid Andes. *J. Glaciol.* 60, 183–191.
- Al Ameri, I.D., Briant, R.M., Engels, S., 2019. Drought severity and increased dust storm frequency in the middle east: a case study from the Tigris-Euphrates Alluvial Plain, Central Iraq. *Weather* 74, 416–426.
- Alfonso, J.A., Cordero, R.R., Rowe, P.M., Neshyba, S., Casassa, G., Carrasco, J., MacDonell, S., Lambert, F., Pizarro, J., Fernandoy, F., et al., 2019. Elemental and mineralogical composition of the western Andean snow (18° s–41° s). *Sci. Rep.* 9, 1–13.
- Avak, S.E., Schwikowski, M., Eichler, A., 2018. Impact and implications of meltwater percolation on trace element records observed in a high-alpine ice core. *J. Glaciol.* 64, 877–886.
- Ayala, A., Pellicciotti, F., MacDonell, S., McPhee, J., Vivero, S., Campos, C., Egli, P., 2016. Modelling the hydrological response of debris-free and debris-covered glaciers to present climatic conditions in the semiarid Andes of central Chile. *Hydrol. Process.* 30, 4036–4058.
- Ayala, A., Pellicciotti, F., Peleg, N., Burlando, P., 2017. Melt and surface sublimation across a glacier in a dry environment: distributed energy-balance modelling of Juncal Norte Glacier, Chile. *J. Glaciol.* 63, 803–822.
- Ayala, A., Fariás-Barahona, D., Huss, M., Pellicciotti, F., McPhee, J., Farinotti, D., 2020. Glacier runoff variations since 1955 in the Maipo River Basin, in the semiarid Andes of central Chile. *Cryosphere* 14, 2005–2027.
- Azzoni, R., Senese, A., Zerboni, A., Maugeri, M., Smiraglia, C., Diolaiuti, G., 2014. A novel integrated method to describe dust and fine supraglacial debris and their effects on ice albedo: the case study of Forni Glacier, Italian Alps. *Cryosphere Discuss.* 8, 3171–3206.
- Barandun, M., Pohl, E., Naegeli, K., McNabb, R., Huss, M., Berthier, E., Saks, T., Hoelzle, M., 2021. Hot spots of glacier mass balance variability in central Asia. *Geophys. Res. Lett.* 48 (11), e2020GL092084.
- Barraza, F., Lambert, F., MacDonell, S., Sinclair, K., Fernandoy, F., Jorquera, H., 2021. Major atmospheric particulate matter sources for glaciers in Coquimbo region, Chile. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 1–11.
- Beach, J.M., Uertz, J.L., Eckhardt, L.G., 2015. Hyperspectral interferometry: sizing microscale surface features in the pine bark beetle. *Microsc. Res. Tech.* 78, 873–885.
- Bish, D.L., Post, J.E., 1993. Quantitative mineralogical analysis using the Rietveld full-pattern fitting method. *Am. Mineral.* 78, 932–940.
- Boisier, J.P., Alvarez-Garretón, C., Cordero, R.R., Damiani, A., Gallardo, L., Garreaud, R.D., Lambert, F., Ramallo, C., Rojas, M., Rondanelli, R., et al., 2018. Anthropogenic drying in central-southern Chile evidenced by long-term observations and climate model simulations. *Elementa* 6.
- Box, J.E., Fettweis, X., Stroeve, J.C., Tedesco, M., Hall, D.K., Steffen, K., 2012. Greenland ice sheet albedo feedback: thermodynamics and atmospheric drivers. *Cryosphere* 6, 821–839. <https://doi.org/10.5194/tc-6-821-2012> URL: <https://tc.copernicus.org/articles/6/821/2012/>.
- Braun, M.H., Malz, P., Sommer, C., Fariás-Barahona, D., Sauter, T., Casassa, G., Soruco, A., Skvarca, P., Seehaus, T.C., 2019. Constraining glacier elevation and mass changes in South America. *Nat. Clim. Chang.* 9, 130–136.
- Brenning, A., 2008. The impact of mining on rock glaciers and glaciers. In: Orlove, B., Wiegandt, E., Luckman, B. (Eds.), *Darkening Peaks: Glacier Retreat, Science, And Society*. University of California, Berkeley, pp. 196–205.
- Brenning, A., Azócar, G.F., 2010. Minería y glaciares rocosos: impactos ambientales, antecedentes políticos y legales, y perspectivas futuras. *Rev. Geogr. Norte Grande* 143–158.
- Brock, B.W., Willis, I.C., Sharp, M.J., 2000. Measurement and parameterization of albedo variations at haut glacier d'arolla, Switzerland. *J. Glaciol.* 46, 675–688. <https://doi.org/10.3189/172756500781832675>.
- Brun, F., Dumont, M., Wagnon, P., Berthier, E., Azam, M.F., Shea, J.M., Sirguey, P., Rabatel, A., Ramanathan, A., 2015. Seasonal changes in surface albedo of Himalayan glaciers from MODIS data and links with the annual mass balance. *Cryosphere* 9, 341–355. <https://doi.org/10.5194/tc-9-341-2015> URL: <https://tc.copernicus.org/articles/9/341/2015/>.
- Burger, F., Brock, B., Montecinos, A., 2018. Seasonal and elevational contrasts in temperature trends in central Chile between 1979 and 2015. *Glob. Planet. Chang.* 162, 136–147.
- Cereceda-Balic, F., Palomo-Marín, M., Bernalte, E., Vidal, V., Christie, J., Fadic, X., Guevara, J., Miro, C., Gil, E.P., 2012. Impact of Santiago de Chile urban atmospheric pollution on anthropogenic trace elements enrichment in snow precipitation at Cerro Colorado, Central Andes. *Atmos. Environ.* 47, 51–57.
- Cereceda-Balic, F., Funes, M.Z.N.R., Vidal, V., Fadic, R., Muñoz, J., Acuña, J., Reinoso, C., Llanos, P., 2014. Glacio-chemical characterisation of trace elements in snow samples (in Spanish).
- Cereceda-Balic, F., Ruggeri, M., Vidal, V., 2020. Glacier retreat differences in Chilean Central Andes and their relation with anthropogenic black carbon pollution. 2020 IEEE Latin American GRSS & ISPRS Remote Sensing Conference (LAGIRS). IEEE, pp. 434–440.
- Codelco Chile, División Andina, 2019. In: Cuadra Pesce, Roberto Alejandro (Ed.), *Adecuación on obras mineras de andina para continuidad operacional actual*, 11. Capítulo 3.11 glaciares. Estudio de Impacto Ambiental, Codelco Chile.
- Cook, J., Edwards, A., Takeuchi, N., Irvine-Fynn, T., 2016. Cryoconite: the dark biological secret of the cryosphere. *Prog. Phys. Geogr.* 40, 66–111.
- Cook, J.M., Hodson, A.J., Gardner, A.S., Flanner, M., Tedstone, A.J., Williamson, C., Irvine-Fynn, T.D., Nilsson, J., Bryant, R., Tranter, M., 2017. Quantifying bioalbedo: a new physically based model and discussion of empirical methods for characterising biological influence on ice and snow albedo. *Cryosphere* 11, 2611–2632.
- Dal Farra, A., Kaspari, S., Beach, J., Bucheli, T.D., Schaeppman, M., Schwikowski, M., 2018. Spectral signatures of submicron scale light-absorbing impurities in snow and ice using hyperspectral microscopy. *J. Glaciol.* 64, 377–386.
- Deckart, K., Clark, A.H., Celso, A.A., Ricardo, V.R., Bertens, A.N., Mortensen, J.K., Fanning, M., 2005. Magmatic and hydrothermal chronology of the Giant Río Blanco porphyry copper deposit, Central Chile: implications of an integrated U-Pb and 40Ar/39Ar database. *Econ. Geol.* 100, 905–934.
- Deckart, K., Clark, A.H., Cuadra, P., Fanning, M., 2013. Refinement of the time-space evolution of the giant Mio-Pliocene Río Blanco-Los Bronces porphyry Cu-Mo cluster, Central Chile: new U-Pb (shrimp ii) and Re-Os geochronology and 40 Ar/39 Ar thermochronology data. *Mineral. Deposita* 48, 57–79.
- Di Mauro, B., 2020. A darker cryosphere in a warming world. *Nat. Clim. Chang.* 10, 979–980.
- Di Mauro, B., Fava, F., Ferrero, L., Garzonio, R., Baccolo, G., Delmonte, B., Colombo, R., 2015. Mineral dust impact on snow radiative properties in the European alps combining ground, UAV, and satellite observations. *J. Geophys. Res. Atmos.* 120, 6080–6097.
- Di Mauro, B., Julitta, T., Colombo, R., 2016. Glacier albedo decrease in the European alps: potential causes and links with mass balances. EGU General Assembly Conference Abstracts pp. EPSC2016–9746.
- Dold, B., 2003. Dissolution kinetics of schwertmannite and ferrihydrite in oxidized mine samples and their detection by differential x-ray diffraction (dxrd). *Appl. Geochem.* 18, 1531–1540.
- Dold, B., Fontboté, L., 2001. Element cycling and secondary mineralogy in porphyry copper tailings as a function of climate, primary mineralogy, and mineral processing. *J. Geochem. Explor.* 74, 3–55.
- Dussailant, I., Berthier, E., Brun, F., Masiokas, M., Hugonnet, R., Favier, V., Rabatel, A., Pitte, P., Ruiz, L., 2019. Two decades of glacier mass loss along the Andes. *Nat. Geosci.* 12, 802–808.
- Eichler, A., Gramlich, G., Kellerhals, T., Tobler, L., Rehren, T., Schwikowski, M., 2017. Ice-core evidence of earliest extensive copper metallurgy in the Andes 2700 years ago. *Sci. Rep.* 7, 1–11.
- El-Zanan, H.S., Lowenthal, D.H., Zielinska, B., Chow, J.C., Kumar, N., 2005. Determination of the organic aerosol mass to organic carbon ratio in improve samples. *Chemosphere* 60, 485–496.
- Falvey, M., Garreaud, R.D., 2009. Regional cooling in a warming world: recent temperature trends in the southeast Pacific and along the west coast of subtropical South America (1979–2006). *J. Geophys. Res. Atmos.* 114.
- Fariás-Barahona, D., Vivero, S., Casassa, G., Schaefer, M., Burger, F., Seehaus, T., Iribarren-Anacona, P., Escobar, F., Braun, M.H., 2019. Geodetic mass balances and area changes of Echaurren Norte Glacier (central Andes, Chile) between 1955 and 2015. *Remote Sens.* 11, 260.
- Fariás-Barahona, D., Ayala, A., Bravo, C., Vivero, S., Seehaus, T., Vijay, S., Schaefer, M., Buglio, F., Casassa, G., Braun, M.H., 2020. 60 years of glacier elevation and mass changes in the Maipo River Basin, Central Andes of Chile. *Remote Sens.* 12, 1658.
- Gäggeler, H., Von Gunten, H., Rossler, E., Oeschger, H., Schotterer, U., 1983. 210Pb-dating of cold alpine firm-ice cores from Colle Gnifetti, Switzerland. *J. Glaciol.* 29, 165–177.
- Gäggeler, H.W., Tobler, L., Schwikowski, M., Jenk, T.M., 2020. Application of the radionuclide 210Pb in glaciology—an overview. *J. Glaciol.* 66, 447–456.
- Garreaud, R., 2009. The Andes climate and weather. *Adv. Geosci.* 22, 3–11.
- Garreaud, R.D., Vuille, M., Compagnucci, R., Marengo, J., 2009. Present-day South American climate. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 281, 180–195.
- Garreaud, R., Lopez, P., Minville, M., Rojas, M., 2013. Large-scale control on the Patagonian climate. *J. Clim.* 26, 215–230.
- Garreaud, R.D., Alvarez-Garretón, C., Barichivich, J., Boisier, J.P., Christie, D., Galleguillos, M., LeQuenne, C., McPhee, J., Zambrano-Bigiarini, M., 2017. The 2010–2015 megadrought in Central Chile: impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 21, 6307–6327.
- Garreaud, R.D., Boisier, J.P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H.H., Veloso-Aguila, D., 2020. The Central Chile mega drought (2010–2018): a climate dynamics perspective. *Int. J. Climatol.* 40, 421–439.
- Gomez, B., Small, R., 1985. Medial moraines of the haut glacier d'Arolla, Valais, Switzerland: debris supply and implications for moraine formation. *J. Glaciol.* 31, 303–307.
- Hansen, J., Nazarenko, L., 2004. Soot climate forcing via snow and ice albedos. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 101, 423–428.
- Hugonnet, R., McNabb, R., Berthier, E., Menounos, B., Nuth, C., Girod, L., Farinotti, D., Huss, M., Dussailant, I., Brun, F., et al., 2021. Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century. *Nature* 592, 726–731.
- Huneus, N., Lapere, R., Mazzeo, A., Ordóñez, C., Donoso, N., Muñoz, R., Rutllant, J.A., 2021. Deep winter intrusions of urban black carbon into a canyon near Santiago, Chile: a pathway towards Andean glaciers. *Environ. Pollut.* 291, 118124.
- Huss, M., Hock, R., 2018. Global-scale hydrological response to future glacier mass loss. *Nat. Clim. Chang.* 1.
- Huss, M., Bookhagen, B., Huggel, C., Jacobsen, D., Bradley, R., Clague, J., Vuille, M., Buytaert, W., Cayan, D., Greenwood, G., et al., 2017. Toward mountains without permanent snow and ice. *Earth's Future* 5, 418–435.
- Jarvis, A., Reuter, H.I., Nelson, A., Guevara, E., et al., 2008. Hole-filled srtm for the globe version 4. available from the CGIAR-CSI SRTM 90m Database <http://srtm.csi.cgiar.org> 15.
- Kaspari, S.D., Schwikowski, M., Gysel, M., Flanner, M., Kang, S., Hou, S., Mayewski, P.A., 2011. Recent increase in black carbon concentrations from a Mt. Everest ice core spanning 1860–2000 ad. *Geophys. Res. Lett.* 38.
- Kaspari, S., Painter, T.H., Gysel, M., Skiles, S., Schwikowski, M., 2014. Seasonal and elevational variations of black carbon and dust in snow and ice in the Solu-Khumbu, Nepal and estimated radiative forcings. *Atmos. Chem. Phys.* 14, 8089–8103.
- Kendall, M.G., 1948. Rank Correlation Methods.
- Klok, E., Oerlemans, J., 2004. Modelled climate sensitivity of the mass balance of morätatschgletscher and its dependence on albedo parameterization. *Int. J. Climatol.* 24, 231–245.
- Lapere, R., Mailler, S., Menut, L., Huneus, N., 2021. Pathways for wintertime deposition of anthropogenic light-absorbing particles on the Central Andes cryosphere. *Environ. Pollut.* 272, 115901.

- Lavanchy, V., Gäggeler, H., Nyeki, S., Baltensperger, U., 1999. Elemental carbon (ec) and black carbon (bc) measurements with a thermal method and an aethalometer at the high-alpine research station Jungfraujoch. *Atmos. Environ.* 33, 2759–2769.
- Liang, S., 2001. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo i: algorithms. *Remote Sens. Environ.* 76, 213–238.
- Lucht, W., Hyman, A.H., Strahler, A.H., Barnsley, M.J., Hobson, P., Muller, J.P., 2000. A comparison of satellite-derived spectral albedos to ground-based broadband albedo measurements modeled to satellite spatial scale for a semidesert landscape. *Remote Sens. Environ.* 74, 85–98.
- Madden, M.E., Bodnar, R., Rimstidt, J., 2004. Jarosite as an indicator of water-limited chemical weathering on mars. *Nature* 431, 821–823.
- Malmros, K., Mernild, S.H., Wilson, R., Yde, J.C., Fensholt, R., 2016. Glacier area changes in the central Chilean and Argentinean Andes 1955–2013/14. *J. Glaciol.* 62, 391–401.
- Mann, H.B., 1945. Nonparametric tests against trend. *Econometrica* 245–259.
- Mardones, P., Garreaud, R.D., 2020. Future changes in the free tropospheric freezing level and rain-snow limit: the case of Central Chile. *Atmosphere* 11, 1259.
- Masek, J.G., Vermote, E.F., Saleous, N.E., Wolfe, R., Hall, F.G., Huemmrich, K.F., Gao, F., Kutler, J., Lim, T.K., 2006. A Landsat surface reflectance dataset for North America, 1990–2000. *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.* 3, 68–72.
- Masiokas, M.H., Christie, D.A., Le Quesne, C., Pitte, P., Ruiz, L., Villalba, R., Luckman, B.H., Berthier, E., Nussbaumer, S.U., González-Reyes, Á., et al., 2016. Reconstructing the annual mass balance of the Echaurren Norte Glacier (central Andes, 33.5 s) using local and regional hydroclimatic data. *Cryosphere* 10, 927–940.
- Masiokas, M., Rabatel, A., Rivera, A., Ruiz, L., Pitte, P., Ceballos, J., Barcaza, G., Soruco, A., Bown, F., Berthier, E., et al., 2020. A review of the current state and recent changes of the Andean cryosphere. *Front. Earth Sci.* 8, 99.
- Muñoz-Sabater, J., Dutra, E., Agustí-Panareda, A., Albergel, C., Arduini, G., Balsamo, G., Boussetta, S., Choulga, M., Harrigan, S., Hersbach, H., et al., 2021. Era5-land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth Syst. Sci. Data Discuss.* 1–50.
- Naegeli, K., Huss, M., 2017. Sensitivity of mountain glacier mass balance to changes in bare-ice albedo. *Ann. Glaciol.* 1–11.
- Naegeli, K., Damm, A., Huss, M., Schaepman, M., Hoelzle, M., 2015. Imaging spectroscopy to assess the composition of ice surface materials and their impact on glacier mass balance. *Remote Sens. Environ.* 168, 388–402.
- Naegeli, K., Damm, A., Huss, M., Wulf, H., Schaepman, M., Hoelzle, M., 2017. Cross-comparison of albedo products for glacier surfaces derived from airborne and satellite (sentinel-2 and Landsat 8) optical data. *Remote Sens.* 9, 110.
- Naegeli, K., Huss, M., Hoelzle, M., 2019. Change detection of bare-ice albedo in the Swiss alps. *TCry* 13, 397–412.
- Oerlemans, J., Hoogendoorn, N., 1989. Mass-balance gradients and climatic change. *J. Glaciol.* 35, 399–405.
- Oerlemans, J., Knap, W., 1998. A 1 year record of global radiation and albedo in the ablation zone of Morteratschgletscher, Switzerland. *J. Glaciol.* 44, 231–238.
- Oliveros, V., Morata, D., Aguirre, L., Féraud, G., Fornari, M., 2007. Magmatismo asociado a subducción del jurásico a cretácico inferior en la cordillera de la costa del norte de Chile (18° 30′–24° s): geoquímica y petrogenesis. *Rev. Geol. Chile* 34, 209–232.
- Osmont, D., Wendt, I.A., Schmidely, L., Sigl, M., Vega, C.P., Isaksson, E., Schwikowski, M., 2018. An 800-year high-resolution black carbon ice core record from Lomonosovfonna, Svalbard. *Atmos. Chem. Phys.* 18, 12777–12795.
- Paul, F., Machguth, H., Kääb, A., 2005. On the impact of glacier albedo under conditions of extreme glacier melt: the summer of 2003 in the alps. *EARSeL eProc.* 4, 139–149.
- Paul, F., Kääb, A., Haeberli, W., 2007. Recent glacier changes in the alps observed by satellite: consequences for future monitoring strategies. *Glob. Planet. Chang.* 56, 111–122.
- Paul, F., Machguth, H., Hoelzle, M., Salzmann, N., Haeberli, W., 2008. Alpinewide distributed glacier mass balance modeling. available from the CGIAR-CSI SRTM 90m Database Darkening Peaks: Glacier Retreat, Science, And Society. 111 15.
- Pellicciotti, F., Helbing, J., Rivera, A., Favier, V., Corripio, J., Araos, J., Sicart, J.E., Carenzo, M., 2008. A study of the energy balance and melt regime on Juncal Norte Glacier, semi-arid Andes of Central Chile, using melt models of different complexity. *Hydrol. Process.* 22, 3980–3997.
- Peña, M.A., Olmedo, F., 2019. Estimación de las variaciones espacio temporales de albedo en los glaciares Olivares, Chile central. *Rev. Geogr. Chile Terra Aust.* 55, 35–44.
- Pouchou, J.L., Pichoir, F., 1991. Quantitative analysis of homogeneous or stratified microvolumes applying the model “pap”. *Electron Probe Quantitation*. Springer, pp. 31–75.
- Ragetti, S., Cortés, G., McPhee, J., Pellicciotti, F., 2014. An evaluation of approaches for modeling hydrological processes in high-elevation, glacierized Andean watersheds. *Hydrol. Process.* 28, 5674–5695.
- RGI, C., 2017. Randolph Glacier Inventory – A Dataset of Global Glacier Outlines: Version 6.0: Technical Report. Digital Media.
- Rowe, P.M., Cordero, R.R., Warren, S.G., Stewart, E., Doherty, S.J., Pankow, A., Schrempf, M., Casassa, G., Carrasco, J., Pizarro, J., et al., 2019. Black carbon and other light-absorbing impurities in snow in the Chilean Andes. *Sci. Rep.* 9, 1–16.
- Schaefer, M., Fonseca-Gallardo, D., Fariás-Barahona, D., Casassa, G., 2020. Surface energy fluxes on Chilean glaciers: measurements and models. *Cryosphere* 14, 2545–2565.
- Shaw, T.E., Gascoine, S., Mendoza, P.A., Pellicciotti, F., McPhee, J., 2020. Snow depth patterns in a high mountain Andean catchment from satellite optical tristereoscopic remote sensing. *Water Resour. Res.* 56, e2019WR024880.
- Shaw, T.E., Ulloa, G., Fariás-Barahona, D., Fernandez, R., Lattus, J.M., McPhee, J., 2021. Glacier albedo reduction and drought effects in the extratropical Andes, 1986–2020. *J. Glaciol.* 67, 158–169.
- Shepherd, G., Terradellas, E., Baklanov, A., Kang, U., Sprigg, K., Nickovic, S., Boloorani, A., Al-Dousari, A., Basart, S., Benedetti, A., et al., 2016. Global Assessment of Sand And Dust Storms. United Nations Environment Programme (UNEP), Nairobi, Kenya 2016.
- Shi, Z., Krom, M.D., Bonneville, S., Baker, A.R., Bristow, C., Drake, N., Mann, G., Carslaw, K., McQuaid, J.B., Jickells, T., et al., 2011. Influence of chemical weathering and aging of iron oxides on the potential iron solubility of Saharan dust during simulated atmospheric processing. *Glob. Biogeochem. Cycles* 25.
- Takeuchi, N., Li, Z., 2008. Characteristics of surface dust on Ürümqi Glacier no. 1 in the Tien Shan mountains, China. *Arct. Antarct. Alp. Res.* 40, 744–750.
- Takeuchi, N., Kohshima, S., Seko, K., 2001. Structure, formation, and darkening process of albedo-reducing material (cryoconite) on a Himalayan glacier: a granular algal mat growing on the glacier. *Arct. Antarct. Alp. Res.* 33, 115–122.
- Tapia, J., Davenport, J., Townley, B., Dorador, C., Schneider, B., Tolorza, V., von Tümpling, W., 2018. Sources, enrichment, and redistribution of As, Cd, Cu, Li, Mo, and Sb in the northern Atacama region, Chile: implications for arid watersheds affected by mining. *J. Geochem. Explor.* 185, 33–51.
- Taylor, J., 1991. Computer programs for standardless quantitative analysis of minerals using the full powder diffraction profile. *Powder Diffract.* 6, 2–9.
- Tedesco, M., Doherty, S., Fettweis, X., Alexander, P., Jeyaratnam, J., Stroeve, J., 2016. The darkening of the Greenland ice sheet: trends, drivers, and projections (1981–2100). *Cryosphere* 10, 477–496. <https://doi.org/10.5194/tc-10-477-2016> URL: <https://tc.copernicus.org/articles/10/477/2016/>.
- Tedstone, A.J., Cook, J.M., Williamson, C.J., Hofer, S., McCutcheon, J., Irvine-Fynn, T., Gribbin, T., Tranter, M., 2020. Algal growth and weathering crust state drive variability in western Greenland ice sheet ice albedo. *Cryosphere* 14, 521–538.
- van der Wal, A.C., Das, P., Tigges, A., Becker, A., 1992. Adhesion molecules on the endothelium and mononuclear cells in human atherosclerotic lesions. *Am. J. Pathol.* 141, 1427.
- Vermote, E., Justice, C., Claverie, M., Franch, B., 2016. Preliminary analysis of the performance of the Landsat 8/oli land surface reflectance product. *Remote Sens. Environ.* 185, 46–56.
- Viale, M., Garreaud, R., 2014. Summer precipitation events over the western slope of the sub-tropical Andes. *Mon. Weather Rev.* 142, 1074–1092.
- Viale, M., Bianchi, E., Cara, L., Ruiz, L.E., Villalba, R., Pitte, P., Masiokas, M., Rivera, J., Zalazar, L., 2019. Contrasting climates at both sides of the Andes in Argentina and Chile. *Front. Environ. Sci.* 7, 69.
- Warren, S.G., 1980. Impurities in snow: effects on albedo. *Ann. Glaciol.* 5, 177.
- Warren, S.G., 1984. Impurities in snow: effects on albedo and snowmelt. *Ann. Glaciol.* 5, 177–179.
- Weidemann, S.S., Sauter, T., Malz, P., Jaña, R., Arigony-Neto, J., Casassa, G., Schneider, C., 2018. Glacier mass changes of lake-terminating grey and Tyndall glaciers at the southern Patagonia icefield derived from geodetic observations and energy and mass balance modeling. *Front. Earth Sci.* 6, 81.
- WGMS, 2021. Fluctuations of Glaciers Database. Technical Report. World Glacier Monitoring Service, Zurich, Switzerland <https://doi.org/10.5904/wgms-fog-2021-05>.
- Wiscombe, W.J., Warren, S.G., 1980. A model for the spectral albedo of snow. I: pure snow. *J. Atmos. Sci.* 37, 2712–2733.
- Wu, G., Xu, T., Zhang, X., Zhang, C., Yan, N., 2016. The visible spectroscopy of iron oxide minerals in dust particles from ice cores on the Tibetan Plateau. *Tellus B Chem. Phys. Meteorol.* 68, 29191.
- Zemp, M., Huss, M., Thibert, E., Eckert, N., McNabb, R., Huber, J., Barandun, M., Machguth, H., Nussbaumer, S.U., Gärtner-Roer, I., et al., 2019. Global glacier mass changes and their contributions to sea-level rise from 1961 to 2016. *Nature* 568, 382–386.
- Zhang, Y., Perron, N., Ciobanu, V.G., Zotter, P., Mingüillón, M.C., Wacker, L., Prévôt, A.S., Baltensperger, U., Szidat, S., 2012. On the isolation of oc and ec and the optimal strategy of radiocarbon-based source apportionment of carbonaceous aerosols. *Atmos. Chem. Phys.* 12, 10841–10856.
- Zhang, X., Wu, G., Zhang, C., Xu, T., Zhou, Q., 2015. What is the real role of iron oxides in the optical properties of dust aerosols? *Atmos. Chem. Phys.* 15, 12159–12177.



ORD. B32/N° 4729

ANT.: ORD. N°202199102923 del 03 de Noviembre de 2021, de la Dirección Ejecutiva **del Servicio** de Evaluación Ambiental.

MAT.: Se pronuncia sobre la Adenda extraordinaria del proyecto "Los Bronces Integrado".

SANTIAGO, 26 de noviembre de 2021

DE : JEFA **DIVISIÓN DE POLÍTICAS PÚBLICAS SALUDABLES Y PROMOCIÓN**

A : **JEFA DIRECCIÓN EJECUTIVA DEL SERVICIO DE EVALUACIÓN AMBIENTAL**

En atención a lo solicitado en el Oficio citado en el AMT, se informa que se cesó la Adenda extraordinaria del "Proyecto Los Bronces Integrado" presentada por el Sr. Juan Carlos Román Yáñez, en representación de Anglo American Sur S.A. Al respecto, puedo informar que este órgano de administración del Estado se pronuncia con observaciones sobre la Adenda antes mencionada y se indica a usted lo siguiente:

1. En cuanto a los permisos ambientales sectoriales de competencia de la Autoridad Sanitaria Regional, contenidos en los artículos 126, 138, 139, 140 y 142 del Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental, y el pronunciamiento del art. 161 del citado reglamento, es posible informar que los antecedentes presentados durante el proceso de evaluación dan respuesta a los contenidos técnicos y formales estipulados para el otorgamiento de dichos permisos y pronunciamiento, para las correspondientes instalaciones que se habilitarán en las fases de construcción, operación y cierre del proyecto.

Sin embargo, teniendo presente que a la fecha subsisten observaciones sobre los antecedentes técnicos acreditados en la evaluación de impacto ambiental, las que se detallan en el apartado 3 del presente oficio, esta Subsecretaría mantendrá pendiente su pronunciamiento a este respecto, hasta que el proponente pueda dar respuesta a lo observado en el citado punto.

2. Sobre la predicción y evaluación de impacto ambiental, en particular, los antecedentes presentados para descartar la eventual generación de riesgo para la salud de la población derivado de las actividades del proyecto, se señala lo siguiente:
 - a) En el Ordinario B32/N°4090 del 9 de septiembre de 2019, de la Subsecretaría de Salud Pública, numeral 2.3 letras b), c) y d), y numeral 4 punto 4.1, se planteó la importancia de identificar todos los receptores de interés para la evaluación de calidad del aire, y evaluar la posibilidad de generar un impacto ambiental significativo sobre este componente lo que se traduciría en una eventual generación de riesgo para la salud de la población asociado a las partes y obras del proyecto.
 - b) Posteriormente, en el Ordinario B32/N°4807 del 9 de noviembre de 2020, de esta Subsecretaría, numeral 2 puntos 2.6 y 2.7, y numeral 4, puntos 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4, se reiteró al proponente que se debían identificar claramente los receptores y los niveles de exposición a los contaminantes del aire, en particular sobre las concentraciones de material particulado en las fracciones que se encuentran reguladas en nuestro país (MP-2,5 y MP- 10).

- c) En esta presentación, el proponente acredita el informe denominado “Aportes en Receptores Humanos, Zona Agrícola, Áreas de Pastoreo, Zona Turística y de Recreación” (Anexo ADE-120-1, Adenda Complementaria), en el que entrega información de receptores ubicados en el área de influencia del proyecto, sobre los cuales se proyecta la calidad del aire para los años 2017 (estado actual), 2024 y 2030, referida a los contaminantes MPS; MP10; MP-2,5; CO; NOx; SO2.
- d) Que la información señalada en el numeral anterior, entregada para los citados contaminantes y para los estadígrafos definidos en las normas vigentes, muestra que en al menos 5 receptores discretos identificados en el área de influencia del proyecto, se evidencia un aumento significativo en las concentraciones del contaminante MP-10, respecto del promedio anual, a partir del año 2024 y que aumenta para el año 2030, según las fases del proyecto.

ID	Nombre o Localidad	Coord. Este	Coord. Norte	2017 MP-10 anual	2024 MP-10 anual	2030 MP-10 anual
2	Lo Ermita	369943	6306848	2,6	11,2	20,3
3	15	369219	6306438	2,5	9,9	17,8
18	12	372893	6308952	2,9	13	23,8
7	19	366778	6306585	1,8	4,9	8,0
8	20	365688	6306659	1,7	4,5	7,2

Fuente: Elaboración en base a la revisión

- e) En efecto, para el receptor identificado como 2 en el Anexo ADE-120-1, para el año 2017 la concentración ambiental de MP-10 promedio anual es de 2,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que la proyección con proyecto fase 1 aumenta a 11,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (año 2024), y para el año 2030 sube a 20,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, es decir, para este último año se habrá aumentado en 17,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ la concentración promedio del valor anual de MP-10, lo que en términos porcentuales respecto del valor de la norma (50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) corresponde a un aumento de 35,4%. De la misma forma, se constata que para el receptor identificado como 3, el aumento corresponde a un 30,1% y para el receptor identificado como 18 el aumento es de 41,6%.
- f) Lo anterior, en una zona declarada saturada por material particulado, tanto en su fracción fina (MP-2,5) como gruesa (MP-10), para las normas diaria y anual, y afecta al Plan de Descontaminación de la Región Metropolitana.
- g) No obstante, esto último, el proponente no reconoce que el proyecto generará riesgo para la salud de la población, derivado del deterioro de la calidad del aire por el aumento en las emisiones atmosféricas basales.

Teniendo presente lo descrito anteriormente, es opinión de la Subsecretaría de Salud Pública que los antecedentes técnicos acreditados en la presente adenda, permitirían concluir que a consecuencia del proyecto se generaría un aumento significativo en la concentración ambiental de MP-10 en el área de influencia, generando un impacto potencialmente significativo en la calidad del aire, esto es, riesgo para la salud de la población, de acuerdo a lo establecido en la letra a. del artículo 5 del D.S N°40/2021 del MMA.

Saluda atentamente a Ud.,

Por orden de la Subsecretaría de Salud Pública
Según Res. Ex. N°472 del 23.08.2005


MARÍA PAZ GRANDÓN SANDOVAL
JEFA DIVISIÓN DE POLÍTICAS PÚBLICAS SALUDABLES Y PROMOCIÓN

- DISTRIBUCIÓN:
- **SEREMI** de Salud Región: Metropolitana y Valparaíso
 - Subsecretaría de Salud Pública
 - División de Políticas Públicas Saludables y Promoción (DIPOL)
 - Departamento de Salud Ambiental (DIPOL)
 - Oficina de Partes

ORD. N° 202199102923
Santiago, 03 de Noviembre de 2021
ANT: ORD N° 190823, mediante el cual se envía el
Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto
"Proyecto Los Bronces Integrado"
MAT: Envío Adenda.

DE: Paola Andrea Basadre Barros
Dirección Ejecutiva
Servicio de Evaluación Ambiental

A: Según distribución

A través del presente comunico a usted que el señor Rodrigo Benjamín Subiabre Valdés, en representación de Anglo American Sur S.A., ha sometido al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), con fecha 3 de noviembre de 2021 la Adenda del proyecto "Proyecto Los Bronces Integrado".

Dicha Adenda, Informe consolidado de solicitud de aclaraciones rectificación y ampliación (ICSARA) y los documentos asociados se encuentran disponibles en el sitio web <http://www.sea.gob.cl>, al cual usted podrá ingresar utilizando su rut y clave personal.

Al respecto, y en virtud del artículo 40 del D.S. N° 40 de 2012 del Ministerio de Medio Ambiente, solicito a usted pronunciarse exclusivamente el ámbito de sus competencias, sobre lo siguiente:

Al respecto, solicito a usted:

- a. Señalar fundadamente si los errores, omisiones o inexactitudes del proyecto o actividad han sido subsanados, en especial:
- Indicar si el proyecto o actividad en cuestión cumple con la normativa de carácter ambiental,
 - Indicar si se han identificado todos los permisos ambientales sectoriales aplicables al proyecto, y expresamente se pronuncie respecto del cumplimiento de los requisitos y contenidos de dichos permisos, si corresponde; o
 - Informar si las medidas propuestas en el Estudio de Impacto Ambiental se hacen cargo adecuadamente de los efectos, características o circunstancias establecidas en el artículo 11 de la Ley 19.300, sobre Bases Generales del Medio Ambiente.
- b. Señalar fundadamente si el proyecto ha sido objeto de aclaraciones, rectificaciones o ampliaciones que afecten sustantivamente los impactos ambientales del proyecto o actividad.
- c. Señalar fundadamente si las observaciones presentadas por la comunidad que se enmarquen en el ámbito de su competencia han sido abordadas de manera adecuada por el titular.

El mencionado informe deberá ser remitido a este Servicio, a más tardar el día 24 de noviembre de 2021.

En caso de requerir nuevas aclaraciones, rectificaciones o ampliaciones, éstas sólo podrán referirse a los antecedentes presentados en la Adenda.

Ante cualquier consulta comunicarse con la Señora Carolina Connelo Negrete Leal, dirección de correo electrónico carolina.negrete@sea.gob.cl, número telefónico 226164331.

Sin otro particular, saluda atentamente a usted,

Paola Andrea Basadre Barros
Dirección Ejecutiva
Servicio de Evaluación Ambiental

VHR/CNL

Adj. lo indicado

Distribución:

- (Interregional) Consejo de Monumentos Nacionales
- (Interregional) Corporación Nacional Forestal, Dirección Ejecutiva
- (Interregional) Dirección General de Aguas
- (Interregional) Servicio Agrícola y Ganadero, Dirección Nacional
- (Interregional) Servicio Nacional de Geología y Minería
- (Interregional) Subsecretaría de Salud Pública, Ministerio de Salud
- (Interregional) Subsecretaría del Medio Ambiente
- (RM) DCH, Región Metropolitana de Santiago
- (RM) Gobierno Regional, Región Metropolitana
- (RM) Ilustre Municipalidad de Colina
- (RM) Ilustre Municipalidad de Lo Barnechea
- (RM) SEREMI de Transportes y Telecomunicaciones, Región Metropolitana de Santiago
- (RM) SEREMI de Vivienda y Urbanismo, Región Metropolitana de Santiago
- (RM) SEREMI MOP Región Metropolitana de Santiago
- (V) Ilustre Municipalidad de Los Andes

C/c:

- Oficina de partes
- Expediente del Proyecto "Proyecto Los Bronces Integrado"
- División de Evaluación y Seguimiento Ambiental, Servicio de Evaluación Ambiental Dirección Ejecutiva

Firmas Electrónicas:

- Firmado por: SERVICIO DE EVALUACIÓN AMBIENTAL Fecha-Hora: 03-11-2021 23:25:15:289 UTC -03:00
- Firmado por: Paola Andrea Basadre Barros Fecha-Hora: 03-11-2021 23:25:19:42 CLST-0300
- Firmado por: Paola Andrea Basadre Barros Fecha-Hora: 03-11-2021 23:28:24:242 CLST-0300

El documento original está disponible en la siguiente dirección url: <https://infofirma.sea.gob.cl/Documentos/SEA/MoviarDocumento?decid=03/11/2021/23:25:19:42/40940b6c6544cf173741>