Análisis crítico del EIA del proyecto Los Bronces Integrado:

IMPACTOS SOBRE LA HIDROLOGÍA

DR. ALEXIS CARO

ABRIL 2024,
CIUDAD DE PARRAL

GREENPEACE

Elaborado por
Dr. Alexis Caro

Edición general
Silvana Espinosa Yáñez

Diseño gráfico y diagramación
Pamela Ortega Campos

Índice de contenidos

1. Resumen 4

2. Introducción 6

3. Resultados y discusión 8

3.1. Ciclo hídrico actual en las 3 cuencas intervenidas 9

3.2. Impactos ambientales en el ciclo hídrico identificados en la RCA 10

3.3. Análisis crítico de los impactos ambientales en el ciclo hídrico 11

3.4. Impactos ambientales por depositación de Material Particulado Sedimentable y gases en criósfera identificados en la RCA 14

3.5. Análisis crítico de los impactos ambientales por depositación de Material Particulado Sedimentable y gases en criósfera 16

3.6. Impactos ambientales por intervención en la calidad del agua superficial y subterránea identificados en la RCA 28

3.7. Análisis crítico de los impactos ambientales por intervención en la calidad del agua superficial y subterránea identificados en la RCA 29

4. Consideraciones finales 34

5. Referencias 38

6. Anexos 42

1. Resumen

Los estudios sobre la criósfera presentados por Anglo American en el Servicio de Evaluación Ambiental para el proyecto Los Bronces Integrado no midieron los cambios en la tasa de ablación de glaciares ni en la cobertura de nieve debido a la depositación de Material Particulado Sedimentable (MPS) en la subcuenca del Estero Yerba Loca. Sin embargo, es importante destacar que la cobertura de nieve es la principal fuente de agua en esta subcuenca, seguida por los glaciares. Durante el verano, el derretimiento de hielo y nieve glaciar es crucial para el suministro de agua del Estero Yerba Loca, que contribuye con cerca del 40% del caudal del Río Mapocho. El estudio de impacto ambiental presentó algunas inconsistencias metodológicas notables. En primer lugar, en la subcuenca Yerba Loca no se midió el MPS en glaciares descubiertos y la simulación de la acumulación de MPS no fue validada. En segundo lugar, el umbral de afectación del MPS en los glaciares, que podría influir en el albedo de la superficie glaciar y, por ende, en la tasa de ablación, no se pudo determinar con las mediciones presentadas. El albedo se estimó sólo durante 4 años en un amplio rango de elevación y superficies, sin existir una validación a través de mediciones en glaciares. No se realizaron mediciones in situ para observar cambios en la tasa de ablación en relación con cambios en el albedo. La ausencia de mediciones directas en los glaciares y en la cobertura de nieve impide conocer el impacto del MPS en la tasa de ablación. Esto es preocupante ya que las características mineralógicas y químicas del Estero Yerba Loca condicionan la calidad del agua del Río Mapocho, y los cambios en la tasa de ablación de nieve (a escala estacional) y de glaciares (estacional y decadal) podrían afectar el caudal del Estero Yerba Loca y con ello su calidad.

Fotografía: Claudio Santana.

2. Introducción

El Servicio de Evaluación Ambiental (SEA), en la Resolución de Calificación Ambiental N° 20229900122/2022 (RCA) del 2 de mayo del 2022, recomendó rechazar el proyecto Los Bronces Integrado (LBI). Sin embargo, el proyecto fue sometido a una nueva evaluación, siendo aprobado a través de la Resolución N° 202399101873/2023.
El proyecto LBI busca extender las operaciones del proyecto Los Bronces a rajo abierto en las cuencas altas de los ríos San Francisco, Blanco y subterráneamente en la cabecera de la subcuenca Estero Yerba Loca. El SEA estableció que el proyecto, no define adecuadamente el área de afectación de la calidad del aire, ignorando cualquier información que permita descartar el riesgo a la salud de la población. Debido a lo anterior, el proyecto fue rechazado. Por otro lado, los posibles impactos en el recurso hídrico, asociados a cambios en el volumen del agua y a su calidad, tanto en superficie como subterránea, fueron considerados como un impacto ambiental no significativo.

La RCA identificó:

• 42 ítems de impactos ambientales, de los cuales sólo 10 fueron relacionados con recursos hídricos, teniendo énfasis en la subcuenca Estero Yerba Loca. De los 39 compromisos ambientales, 8 tuvieron relación con el monitoreo de cambio de volumen y calidad de agua en la subcuenca Estero Yerba Loca y solo uno en la subcuenca Río San Francisco. Sin embargo, estos compromisos fueron modificados en la Resolución N° 202399101873/2023, al igual que el plan de prevención de contingencia y emergencia.

Respecto a los 10 impactos ambientales relacionados con posibles cambios en el volumen y calidad fisicoquímica del agua, se prestó especial atención a (i) los glaciares y en su contribución hídrica a los flujos de agua (debido a depositación de MPS y vibraciones) y (ii) en los flujos de agua subterránea y superficial como también en su calidad fisicoquímica.

El informe analiza las inconsistencias metodológicas presentadas en la RCA y no abordadas en la Resolución N° 202399101873/2023, respecto a la identificación de posibles impactos en los componentes hidrológicos y glaciológicos de las subcuencas posiblemente intervenidas por el proyecto LBI.
La estructura de este informe comprende los impactos ambientales identificados en la RCA, los cuales son brevemente descritos en términos de intervención en el balance hídrico (sección 2.2), depositación de MPS en glaciares (sección 2.4), e intervención en la calidad del agua (sección 2.6). Asociado a estas secciones, es presentado el análisis de las metodologías utilizadas para detectar o descartar cada impacto.

Fotografía: Claudio Santana.

3.

Resultados y discusión

DR. ALEXIS CARO
ABRIL 2024
CIUDAD DE PARRAL

3.1. Ciclo hídrico actual en las 3 cuencas intervenidas

El proyecto LBI contempla intervenir la microcuenca La Disputada y las cuencas Río Blanco y Yerba Loca (Figura 1). Estas unidades comprenden entradas de agua principalmente por medio de precipitaciones como nieve. Solo Yerba Loca posee contribución hídrica relevante desde glaciares. A excepción de Yerba Loca, La Disputada y Río Blanco no presentan escorrentía superficial, y todas las aguas infiltradas son tratadas o incorporadas en el sistema productivo. Es debido a estos antecedentes que la RCA estudió la subcuenca Estero Yerba Loca sobre las otras dos.

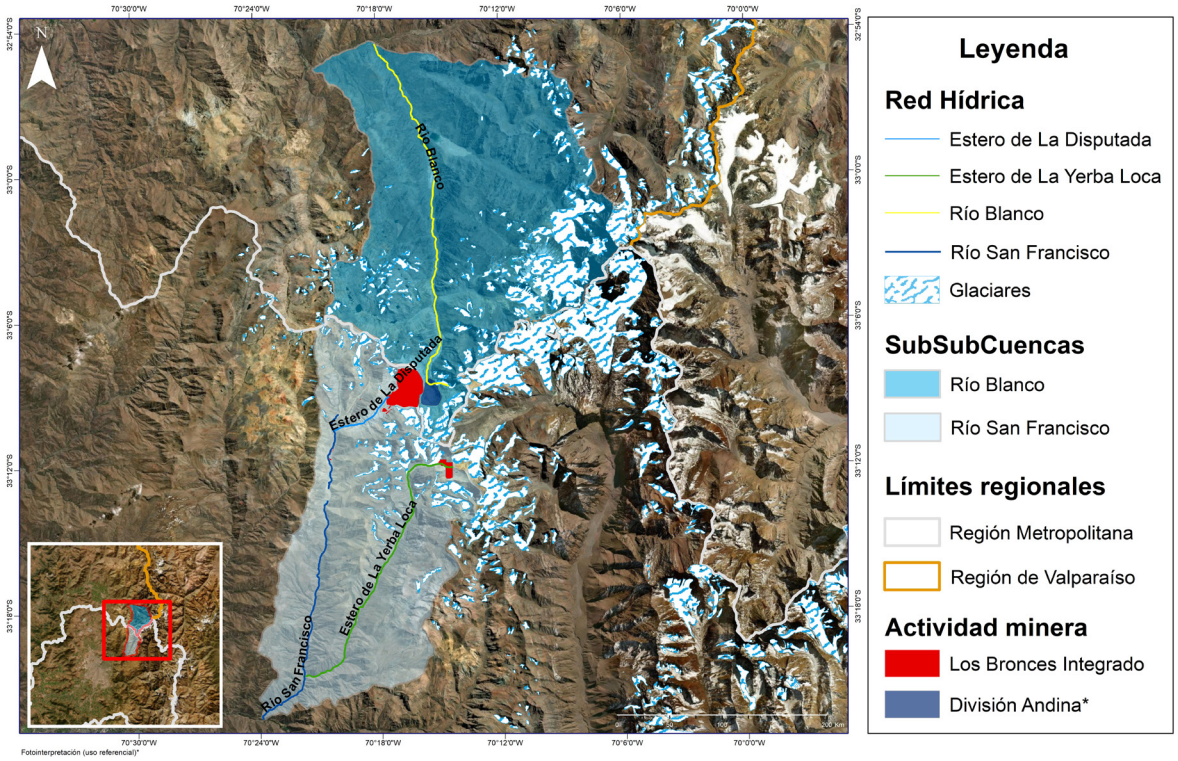


Figura 1. Áreas de intervención del proyecto Los Bronces Integrado en subcuencas río San Francisco (La Disputada), Río Blanco y Estero Yerba Loca.
Fuente: Elaboración propia.

3.2. Impactos ambientales en el ciclo hídrico identificados en la RCA

Afectación hídrica en las subcuencas intervenidas

En el Impacto n°7 “Efectos adversos del proyecto sobre el recurso natural agua por variación del régimen hidrológico por obras y actividades del Proyecto”, se identifican los efectos en la variación del régimen hídrico debido a la generación de MPS y tronaduras, concluyéndose que los glaciares descubiertos no serán afectados. Se establece que en la microcuenca La Disputada no tiene escurrimiento superficial y que la subcuenca Río Blanco no tiene afectación. En la subcuenca Estero Yerba Loca, se justifica que el volumen de agua proveniente de glaciares no es relevante respecto al volumen de agua total que aporta al Río Maipo. Esta comparación se realiza considerando el área de las superficies glaciares. Debido a lo anterior, se dará especial atención a los posibles impactos que pudiesen ocurrir en la subcuenca Estero Yerba Loca.

El titular señala que Los Bronces Subterráneo, bajo la subcuenca Estero Yerba Loca, será desarrollado en roca impermeable (dominio primario), por lo que no provocará cambios en la hidrología. Cambios en la hidrología podrían deberse a variaciones en el aporte hídrico proveniente de los glaciares. Sin embargo, los glaciares no serán afectados por depositación de MPS (detalles en sección 2.2.1.1.), definiéndose el límite del área de influencia en la isolínea de 20 mg/m2-día de MPS (Figura A1), la cual no abarca a los glaciares de la subcuenca.

Afectación hídrica subterránea en la microcuenca La Disputada y subcuenca Estero Yerba Loca

Los efectos en el agua subterránea de la microcuenca La Disputada son abordados en el Impacto n°9 “Efectos adversos sobre el recurso natural agua asociado a eventuales variaciones de nivel piezómetro y/o cambios de flujos del agua subterránea en el Área Los Bronces”.

La microcuenca La Disputada (área Los Bronces) sólo presenta flujos subsuperficiales y eventualmente subterráneos, sin identificarse la presencia de acuíferos (comportamiento de acuitardo, formación geológica que permite el paso del agua muy lentamente). Las obras se desarrollarán en roca permeable (dominio secundario, relacionado a roca con alto nivel de fractura y que podría permitir el paso de agua) y principalmente en roca impermeable (dominio primario, asociado a roca con bajo nivel de fracturas, lo que dificulta el paso de agua). El tramo en roca permeable no genera drenaje ya que el acuitardo no se encuentra saturado y posee un nivel freático por debajo de la elevación del túnel. Además, a medida que los túneles se acercan a la divisoria de aguas, desde la microcuenca La Disputada a la subcuenca Estero Yerba Loca, estos pasan a desarrollarse en roca impermeable. Todas las aguas en la microcuenca La Disputada son interceptadas por un muro cortafugas, el cual se encuentra operativo. El muro contafugas intercepta las aguas subsuperficiales, impidiendo su flujo aguas abajo. Las aguas captadas serán tratadas en la planta de neutralización de San Francisco, cuya capacidad aprobada es de 380 l/s.

La Adenda señala lo siguiente: Se presenta un Plan de Contingencia que se hace cargo de un eventual afloramiento inducido de agua durante la operación. Además, se incorpora un monitoreo en las obras subterráneas durante la fase de construcción, con el objetivo de verificar la desconexión de la microcuenca La Disputada y la subcuenca Estero Yerba Loca.
La autoridad solicitó incorporar el tramo completo del Túnel Los Sulfatos en la modelación. El titular responde que no lo estima necesario, ya que el resto de su extensión bajo la subcuenca Estero Yerba Loca, se desarrollará en dominio de roca primaria, donde no existirán flujos subterráneos significativos (p. e.j., flujo de 0,1 l/s en un tramo de 10 km).
En el Túnel Los Sulfatos existente, las muestras hidroquímicas e isotópicas en el primer tramo (2.4 km) en la microcuenca La Disputada, concuerdan con las propiedades de un acuitardo (con infiltraciones desde la superficie).

Adicionalmente, en el Impacto n°10 “Efectos adversos sobre el recurso natural agua asociado a eventuales variaciones de nivel piezómetro y/o cambios de flujos del agua subterránea bajo la cuenca del estero Yerba Loca por la construcción de obras subterráneas del Proyecto en el Área Los Bronces Subterráneo”, se trata la información obtenida desde el Túnel Los Sulfatos y piezómetros superficiales de la parte alta de la subcuenca Estero Yerba Loca. La modelación hidrogeológica identifica a los dominios primario (impermeable) y secundario (permeable), los cuales se encuentran hídricamente desconectados. La infiltración normal que se genera a través de la roca permeable llega hasta la roca impermeable que actúa como límite del flujo de agua. Debido a esto, el agua que puede estar presente en roca permeable escurre hacia elevaciones inferiores siguiendo la topografía superficial.

La Adenda señala lo siguiente: El proyecto implementará un Plan de Contingencia para el control de un eventual

ingreso de agua al túnel desde el sector de roca primaria, tanto para la etapa de construcción como la de operación. Además, el proyecto promete un "Monitoreo Integral de los objetos de protección en Yerba Loca y el Plan de Seguimiento Voluntario Hidrogeología Fase de construcción y operación. En este aspecto, la autoridad solicita precisar el monitoreo propuesto en la subcuenca Estero Yerba Loca.

Afectación hídrica superficial debido a cambios en el agua subterránea en Estero Yerba Loca

En el Impacto n°12 "Efecto adverso sobre el recurso natural agua por la disminución de los aportes de flujos subterráneos al agua superficial en la cuenca alta del estero Yerba Loca", se establece que en Los Bronces Subterráneo operará en roca impermeable a ~100 m del límite con la roca permeable. Las obras podrían producir desplazamientos verticales no relevantes, inferiores a los 3 cm, al término de la vida útil del Proyecto.

La Adenda señala lo siguiente: El proyecto propone el Plan de Seguimiento Voluntario cuenca alta del estero Yerba Loca – Calidad de aguas Superficial (Fase de Operación). Se informa de los puntos de monitoreo de agua superficial que actualmente forman parte del Plan de Seguimiento Ambiental y del Plan de Alerta Temprana implementados anteriormente en el Proyecto Desarrollo Los Bronces (RCA N°3159/2007). Estos planes permiten controlar la calidad del agua en los esteros San Francisco y Yerba Loca, y Río Mapocho en 5 puntos. Se controlan parámetros físicoquímicos que permitan identificar potenciales problemas al interior y fuera de la faena minera.

3.3. Análisis crítico de los impactos ambientales en el ciclo hídrico

Afectación hídrica en las subcuencas intervenidas: Estero Yerba Loca

El titular, en el Impacto n°7, menciona que el volumen de agua proveniente de glaciares de la subcuenca Estero Yerba Loca no es relevante respecto al volumen de agua total que aporta el Río Maipo. Sin embargo, es fundamental señalar que la subcuenca Estero Yerba Loca contribuye primero con sus aguas a la cuenca Río Mapocho, tributario del Río Maipo. La comparación realizada por el titular en la Tabla 1, sobre la contribución glaciar se basa en la comparación del área de las superficies glaciares, dejando de lado la estacionalidad de la contribución hídrica de los glaciares a los ríos, la cual ocurre principalmente durante los meses de verano (enero-marzo) en la cuenca Río Maipo (Ayala et al., 2020). Respecto a esta afirmación descontextualizada espacialmente por parte del titular, la autoridad no menciona algún comentario.

Código DGA	Hidrografía Oficial	Glaciares	Área (km²)	Porcentaje (%)
57	Cuenca	Río Maipo	388	100,00%
572	Subcuenca	Río Mapocho Alto	17,9	4,61%
5721	Subcuenca	Río San Francisco	14,5	3,74%
-	Quebrada	La Disputada	1,8	0,46%
-	Quebrada	Yerba Loca (Sector Alto)	6	1,55%

Tabla 1. Superficie englaciada en la cuenca Río Maipo y en las subcuencas de la cuenca Río Mapocho Alto.
Fuente: RCA en página 93.

En relación con la superficie glaciar de la subcuenca Estero Yerba Loca, el estudio de Marangunic et al., 2021 mencionan que la subcuenca Río San Francisco, que comprende las subcuencas de los esteros Yerba Loca y San Francisco, cuenta con el 72% de la superficie total englaciada de la cuenca Río Mapocho. La subcuenca Río Molina, tributaria del Río Mapocho, posee el 26% de la superficie englaciada. En la Figura 2 se observan las 3 subcuencas englaciadas de la cuenca Río Mapocho, destacando que sólo la subcuenca Río San Francisco contiene los 4 tipos de crioformas identificadas en el estudio (glaciares de montaña, valle, rocoso y glaciarete). En la Figura A2, es presentada la distribución de los glaciares en las subcuencas del Río Mapocho.

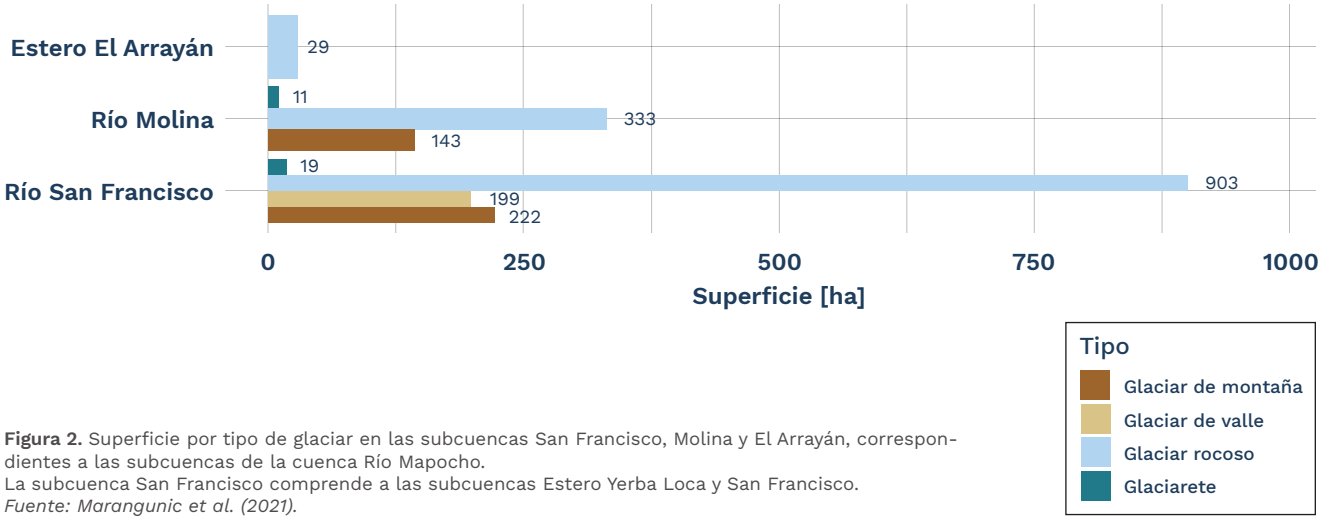


Figura 2. Superficie por tipo de glaciar en las subcuencas San Francisco, Molina y El Arrayán, correspondientes a las subcuencas de la cuenca Río Mapocho.
La subcuenca San Francisco comprende a las subcuencas Estero Yerba Loca y San Francisco.
Fuente: Marangunic et al. (2021).

En relación con la importancia del agua proveniente de los glaciares en la subcuenca Estero Yerba Loca, el informe Línea Base de Calidad de Agua Superficial indica que el caudal máximo en la estación Mapocho Los Almendros (comprende caudales de las subcuencas San Francisco, Yerba Loca y Molina), ocurre a inicio de primavera (octubre-noviembre, periodo 2016-2018). Además, el caudal proveniente de la subcuenca Estero Yerba Loca contribuye cerca del 40% (aprox. 0.8 m3/s) del caudal del Río Mapocho a fines de verano (febrero-marzo) (Figura 3, AMTC, 2018). Por lo que este caudal podría ser asociado principalmente a la contribución glaciar y escorrentía remanente de la fusión de nieve, la cual muestra su máxima contribución de caudal a fines de primavera. El informe de Línea Base Hidrología señala que durante los meses de verano la línea de nieve promedio 2000-2015 se encuentra sobre los 4000 m s.n.m. (Figura A3), correspondiente a la elevación mínima presentada en glaciares.

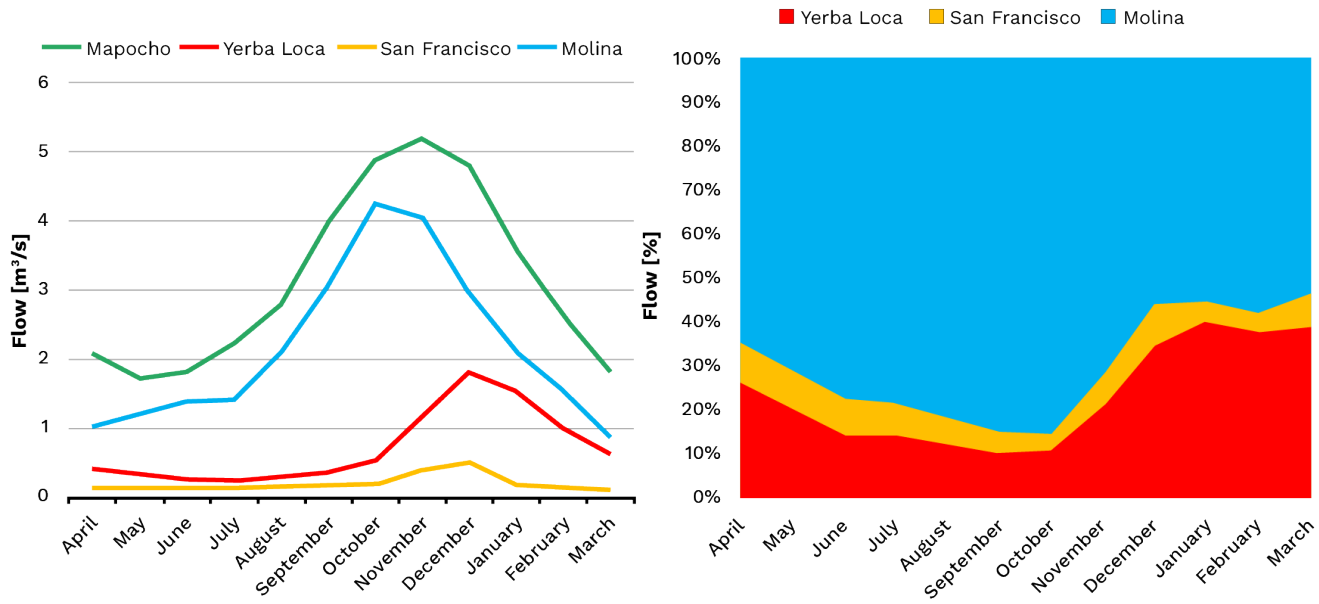


Figura 3. Caudales medios mensuales en el Estero Yerba Loca, Río San Francisco, Río Molina y Río Mapocho en el periodo 2016-2018.
Fuente: Línea Base Calidad de Agua Superficial en Figura CSP-3.

La declaración de baja relevancia en los glaciares de la subcuenca Estero Yerba Loca, asociada al Río Maipo y no al Río Mapocho, por parte del titular no tiene lugar. El caudal del Río Mapocho (media móvil 5 años) muestra una tendencia a la reducción desde la década de los 80', llegando a los caudales promedio anuales más bajos de los últimos 40 años durante el periodo de megasequía (Figura A5) (DGA, 2021). En este contexto, el Estero Yerba Loca

contribuye cerca del 40% del caudal de verano al río Mapocho, donde la contribución hídrica de los glaciares de la subcuenca Estero Yerba Loca podría ser el mayor componente del caudal, viéndose incrementada durante la magasequía (Gareaud et al., 2017). Durante el periodo 2012-2014 al periodo 2019-2020, la contribución hídrica de los glaciares de la subcuenca Estero Yerba Loca provino en 1er lugar del glaciar Paloma Oeste, seguido de los glaciares El Rincón, Paloma Este, Littoria, Altar Sur y por último el glaciar Paula (Figura A4) (Marangunic et al., 2021). Para el año 2019-2020, los glaciares de la subcuenca Estero Yerba Loca pudieron haber contribuido máximo 0,26 m3/s promedio anual. Este monto puede ser asociado a los meses de verano (enero-marzo), qué es cuándo ocurre la fusión del hielo glacial. Esta contribución hídrica de los glaciares podría llegar hasta ~0.9 m3/s en verano, considerando una pérdida de masa por sublimación de 10% (Ayala et al., 2017). Este caudal es equivalente al agua necesaria para llenar una piscina olímpica en 1 hr.

Adicionalmente, desde la base de datos de derechos de agua administrados por la DGA, el agua de deshielo del río Mapocho Alto (caudal proveniente del río San Francisco, Estero Yerba Loca y río Molina), que escurre superficialmente, es usado principalmente para la industria (48%, 7 m3/s), seguido para bebida/uso doméstico/saneamiento (15%, 2.2 m3/s) y para Riego (4%, 0.5 m3/s). Del total de derechos de aprovechamiento del agua reportados en la subcuenca Mapocho Alto, el 32% no posee el dato de tipo de uso del agua asociado.

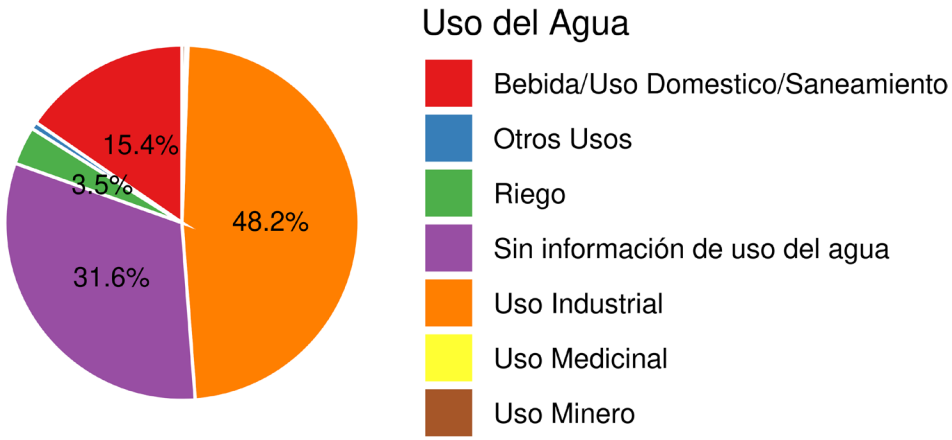


Figura 4. Porcentaje del uso del agua anual en la subcuenca Mapocho Alto, considerando 379 derechos de agua consuntivos (en total de 14.5 m3/s anual) de origen superficial.
De los 379 derechos de agua identificados, solo 161 de ellos (en total 9.9 m3/s anual) posee el dato de caudal asignado y uso del agua. Este análisis sólo consideró los derechos de agua otorgados cuyo volumen corresponde a l/s.
Fuente: Elaboración propia en base a datos extraídos desde https://dga.mop.gob.cl/productosyservicios/derechos_historicos/, fecha de visita 25 abril 2024.

El titular y la autoridad no consideran la posible intervención en el régimen hídrico de la subcuenca Estero Yerba Loca relacionado al derretimiento de la cobertura de nieve, el cual muestra máximos volúmenes en los meses de primavera.

La Línea Base Hidrología muestra que los caudales promedio (Pexc 50%) en Estero Yerba Loca (Figura A6) alcanzan máximos entre 2-1.3 m3/s a fines de primavera e inicio de verano (diciembre, enero, noviembre), mientras que en años húmedos el caudal (Pexc 5%) muestra un caudal máximo de 7 m3/s. Sin embargo, durante años de sequía los caudales bajan a máximos de 1 m3/s (Pexc 95%) durante verano (diciembre a febrero), periodo en que la contribución hídrica glaciar es más relevante. Considerando lo anterior, la concentración del caudal en primavera-verano estaría condicionado a la cantidad de nieve disponible y a su tasa de derretimiento en la subcuenca Estero Yerba Loca, pero también a la contribución hídrica que realizan los glaciares.

En este contexto, el titular señala que si bien el MPS podría aumentar el derretimiento superficial de los glaciares de la subcuenca Estero Yerba Loca, las concentraciones de MPS no son suficientes para afectarlos. Respecto a esto, la autoridad solicitó información química del MPS y argumentó que se debe ampliar el área de posible afectación a glaciares. El titular estimó que estas implementaciones no son necesarias.

3.4. Impactos ambientales por depositación de Material Particulado Sedimentable y gases en criósfera identificados en la RCA

Antecedentes del origen del MPS y su área de afectación sobre glaciares

Los impactos n°8 “Efectos adversos sobre el recurso natural agua por variación de la tasa de ablación de glaciares, por depositación de material particulado sedimentable (MPS)” y n°14 “ Efecto adverso sobre glaciares que genere una alteración de sus aportes hídricos por depositación de MPS”, definen las actividades generadoras de MPS (p. ej., tronaduras en el rajo Los Bronces, tránsito vehicular, remoción de material y salida de la chimenea de la mina subterránea), que podrían afectar la tasa de ablación en los glaciares. El titular señala que “el Proyecto está diseñado para evitar la intervención directa en cualquier glaciar”. El posible impacto de la depositación de MPS es tratado detalladamente en el impacto n°16 “Efecto adverso sobre glaciares que genere una alteración de sus aportes hídricos por depositación de MPS”.

El titular identificó como área de influencia de depositación de MPS en glaciares descubiertos, la isolínea de 20 mg/m2-día de MPS (Figura A1), el cual corresponde al 10% del valor de afectación de 200 mg/m2-día (referencia Norma Suiza denominada “Ordinance on Air Pollution Control (OAPC)”, la cual establece un límite de 200 mg/m²-día de MPS como promedio anual en el sitio de protección”.

La Adenda señala lo siguiente: El titular señala a la Autoridad que el umbral de 20 mg/m2-día de MPS, resulta adecuado para ser empleado como valor de referencia. Además, señala que no existe en el mundo una norma o guía para glaciares que defina parámetros ni niveles de depositación de MPS. La elección del umbral obedeció a los siguientes criterios:

- Estudios en los glaciares descubiertos aledaños.

- Estudios realizados por el Centro de Estudios Científicos (CECs, 2017) con ocasión de la evaluación ambiental del Proyecto “Adecuación Obras Mineras de Andina para Continuidad Operacional Actual”, de Codelco División Andina (DAND).

- En dicho proyecto se usó un valor de 206 mg/m2-día MPS promedio anual, como límite de protección de glaciares descubiertos. Este valor diario, corresponde a un valor acumulado anual de 75 g/m2, cuyo aumento podría alterar la variabilidad natural del albedo de 15% de estos glaciares.

- En la Norma Suiza denominada “Ordinance on Air Pollution Control (OAPC)”, se establece como valor límite de depositación de polvo total en el ambiente, 200 mg/m2-día, como promedio anual. Sin embargo, esta norma no se ha desarrollado específicamente para glaciares.

- Se asumió como umbral de afectación el valor 200 mg/m2-día, que es el menor valor de entre los resultantes del análisis indicado, esto es: 200 mg/m2-día (OAPC), 206 mg/m2-día (CECs, 2017) y 235 mg/m2-día.

Inconsistencias en la definición del área de influencia por MPS

La Adenda señala lo siguiente: La autoridad consultó al titular "respecto de la aplicabilidad de la Norma Suiza" la cual no es específica a la depositación de MPS sobre glaciares, sosteniendo que considerar "20 mg/m2-d (10% de lo permitido por norma), no implica un criterio basado netamente en mediciones físicas de lo que esta cantidad sugiere como posible afectación en la variabilidad natural del albedo para los glaciares descubiertos cercanos al proyecto. La autoridad menciona que es necesario entender y calcular con base en mediciones, y no solo a modelos, cuáles son y serían las tasas de depositación de MPS en los glaciares descubiertos y cubiertos aledaños al Proyecto (Infiernillo, Los Machos, Observatorio, Del Rincón, CL105721063, La Paloma Este, La Paloma Oeste, La Paloma Norte, Altar Sur), considerando todos los aportes de MPS de la zona. De este modo, se podría evaluar si el aporte de MPS que generará el Proyecto es significativo o no, en términos de variabilidad natural del albedo en estos glaciares". Además, la autoridad indica que "según la tabla ADC-44-4, las tasas de depositación de MPS en los colectores del área de estudio, a excepción de Cerro Negro, todos muestran mediciones de MPS superiores a lo establecido por el titular como un valor conservador y no perjudicial para glaciares, es decir, todos los valores son superiores a 20 mg/m2-d. Por lo que se entiende que el área de estudio señalada corresponde a un ambiente perjudicial para los glaciares en términos de depositación de MPS". La autoridad reitera ampliar el área de influencia del Proyecto respecto a MPS, ya que aún se mantienen incertidumbres en cuanto a la posible afectación de impacto ambiental que se pudiera generar en los glaciares descubiertos.

Anglo American responde que "el uso del umbral de 200 mg/m2-día, se señala que este valor no fue tomado de una norma internacional como la mencionada norma suiza, sino que fue calculado para el área de estudio, con datos medidos en terreno que permitieron la modelación del impacto del MPS en los glaciares cercanos al proyecto. Agrega que respecto de la adopción de un marco conservador del 10% del umbral calculado de 200 mg/m2-día, "este 10% no implica en ningún caso, y así lo confirman los documentos presentados en la EIA, Adenda y Adenda complementaria, que se deba modificar el umbral definido para evitar un impacto del MPS en glaciares, el que sigue siendo de 200 mg/m2-día. Este valor del 10% no está relacionado con norma alguna ni con límites de impacto, sino que con una decisión voluntaria del titular del proyecto. Por otro lado, el valor umbral de MPS a partir del cual se pueden generar impactos en el albedo de los glaciares, fue obtenido con mediciones y modelación." Respecto al uso de norma OAPC, el titular señala que "el Proyecto no considera la norma "Ordinance on Air Pollution Control (OAPC) – Suiza" para la evaluación de impactos ambientales, sino que ante la ausencia de normativa internacional, se utilizaron estudios realizados en el año 2017 por el Centro de Estudios Científicos (CECs) para la evaluación ambiental del Proyecto "Adecuación Obras Mineras de Andina para Continuidad Operacional Actual", de Codelco División Andina (DAND) (RCA N°1066/2019)". Además, "En el proyecto de Andina, se adoptó un valor de 206 mg/m2-día de promedio anual. El titular menciona que el umbral de 200 mg/m²-día de MPS como promedio anual es suficiente para descartar impactos significativos sobre glaciares.

Afectación a glaciares por carbono negro

La Adenda señala lo siguiente: La autoridad indicó que "eran insuficientes los antecedentes expuestos por el titular respecto al potencial efecto que el carbono negro ("CN") puede provocar sobre los glaciares descubiertos adyacentes al área de estudio" por lo que "se solicita al titular presentar los resultados de estudios de análisis químicos y mineralógicos del MPS que actualmente se está depositando en los glaciares Del Rincón, Paloma Oeste, Paloma Este y Altar Sur, especificando claramente las concentraciones de CN en las zonas donde se encuentran los colectores, con el fin de determinar cómo esta concentración de CN y MPS afecta a la variación del albedo natural de los glaciares mencionados, y en consecuencia sus tasas de ablación." Sin embargo, el titular responde "que debido a que no existen mediciones de dicho forzante radiativo de manera desagregada dentro del contenido de MPS a la fecha, se expondrán los principales trabajos (actualizados a la fecha) que entregan antecedentes en el entendimiento de la relación de estas impurezas con los balances de energía y procesos de ablación. También se entregarán antecedentes relativos a fuentes de contaminación específica de CN a la zona cordillerana de la zona central,". Además, agrega que "no existe fundamento suficiente para sostener que el proyecto en evaluación afecte significativamente los glaciares del entorno debido a emanaciones de carbono negro.

Compromisos voluntarios para reducir posible afectación

La Adenda señala lo siguiente: La autoridad solicitó a el titular "analizar como parte de los compromisos voluntarios, la protección y cubrimiento de los glaciares" esto, "mediante lona de geotextil reflectante durante los años de máxima emisión atmosférica (años 2024 y 2030)". Los años de máxima emisión de polvo a la atmósfera se encuentran relacionados con la fase de construcción y ejecución del proyecto. El titular respondió que "no

es posible acceder a ella, dado el poco conocimiento que este tipo de medidas tiene en Chile." Sin embargo, se "incorporará como compromiso voluntario, el monitoreo de todos los glaciares blancos en la cabecera de Yerba Loca". Agrega que "se ha logrado demostrar que producto de nuestro proyecto y su sinergia con proyectos del entorno, no se verán afectados los glaciares blancos de las cuencas vecinas, ya que las depositaciones MPS estarán bajo el 10% del límite establecido para alterar su ablación natural".

3.5. Análisis crítico de los impactos ambientales por depositación de Material Particulado Sedimentable y gases en criósfera

Mediciones de MPS utilizadas para definir afectación reciente sobre los glaciares en subcuenca Estero Yerba Loca

En esta sección se presentan los antecedentes que permiten establecer que no es posible descartar la depositación de MPS sobre glaciares por polvo, en los límites establecidos, proveniente de tronaduras realizadas en Los Bronces. Se consideraron aspectos tales como:

- Sólo monitoreo en un glaciar cubierto por detritos rocosos. Sin mediciones de MPS.
- Mediciones de MPS alejadas de glaciares descubiertos.
- Metodología de medición de MPS desconocida, y sin relación con ejecución de tronaduras.
- Puntos de medición de MPS condicionados por ráfagas de viento local.
- Viento sinóptico y simulación del MPS.
- No es posible rastrear el origen químico-mineralógico del MPS.

a. Glaciares estudiados en la Línea Base. El estudio de los glaciares estuvo a cargo de la empresa Geoestudios Asesores S.A., que en la publicación Marangunic et al. (2021) (respaldada por el titular), presentó resultados del comportamiento de la mayoría de los glaciares descubiertos, cubiertos y rocosos encontrados en la subcuenca Estero Yerba Loca desde por lo menos 1999. Sin embargo, la Línea Base presentada sólo incorporó 1 glaciar al interior de la subcuenca (glaciar Altar Sur), el cual posee 70% de su superficie cubierta por detritos de roca (Marangunic et al., 2021). En este glaciar, no se realizaron mediciones de MPS y tampoco mediciones de vibración en roca. En los informes y anexos de la Línea Base Glaciología y Calidad del Aire, no existe información que haga referencia a la medición de concentraciones de MPS o gases que pudieran afectar el albedo de la superficie glaciar y con ello, la tasa de ablación superficial de los glaciares.

b. Puntos de medición de MPS lejanos a los glaciares (Figura A7). La Línea Base de Calidad del Aire, menciona los puntos válidos de medición de MPS: Las Condes (800 m s.n.m.), Piedra Carvajal (3300 m s.n.m.) y Sulfatos (4200 m s.n.m.). El monitoreo fue continuo en la estación Las Condes desde 2016 (35 meses), sin embargo, esta se encuentra a 15 km de los glaciares de la subcuenca Estero Yerba Loca y al suroeste de estos (altamente influenciada por MPS proveniente de la ciudad de Santiago). El monitoreo de MPS en Piedra Carvajal y Sulfatos (al interior de la subcuenca Estero Yerba Loca) fue puntual y estas ubicaciones se encuentran a más de 2 km de distancia de la superficie glaciar descubierta más cercana. Además, estas ubicaciones se encuentran más alejadas del rajo Los Bronces que los glaciares descubiertos. Debido a la distancia entre las superficies glaciares descubiertas y los puntos de medición de MPS, el titular no podría establecer el peso de MPS que se deposita en glaciares descubiertos.

c. Limitaciones metodológicas en la medición de MPS. Existen condiciones técnicas de medición y ubicación de estas que limitan la rigurosidad en el registro de concentraciones de MPS. En la Línea Base (Glaciología y de Calidad del Aire, considerando sus anexos), no se indica la metodología utilizada para contener las muestras de MPS. Sin embargo, de los resultados de las mediciones y en base al monitoreo de glaciares en otros proyectos mineros (p. ej., Pascua Lama, Geoaire Limitada, 2015) es posible que se hayan utilizado contenedores superiores a 5 litros instalados a ~1.5-2 m de altura para atrapar las muestras de MPS. Este método no es apropiado para medir MPS sobre superficie glaciar, ya que (i) la depositación de MPS no es homogénea en toda

la superficie glaciar debido a: sus características topográficas superficiales (p. ej., inclinación, orientación, rugosidad, porcentaje de humedad, presencia de nieve o hielo) y al transporte de MPS por ráfagas de viento. Además, (ii) las concentraciones de MPS que pueden ingresar a estos contenedores son muy susceptibles a ser extraídas por ráfagas de viento (lo cual es respaldado por la alta influencia del viento local descrito en la Línea Base) y a ser intervenidas por la depositación de nieve sobre la boca del contenedor. La nieve podría cubrir parcial o totalmente la boca del contenedor impidiendo la entrada de MPS. El titular no ha respaldado la capacidad de estos colectores para recolectar muestras de MPS, en términos de la tasa de entrada o salida de MPS en los contenedores plásticos y su relación con la depositación de MPS real en la superficie glaciar. Adicionalmente, el titular no incorporó la metodología de medición de MPS.

Respecto a los resultados de concentraciones de MPS (Calidad de Aire y sus anexos), estos son descritos en tasas de concentración de MPS con base a periodos de revisita diferentes y desde la cual se estimó una media anual de tasas de MPS para cada punto de medición. La tasa promedio para todo el periodo de medición de MPS en Piedra Carvajal fue estimada en 41,7 mg/m2-día (considerando periodos que abarcan entre 25 y 322 días entre cada medición) y en Los Sulfatos de 19,9 mg/m2-día (considerando entre 18 y 321 días entre cada medición) (Figura 5, y Figura A8 y A9).
Por ejemplo, se observó que en Piedra Carvajal las mayores concentraciones de MPS ocurren durante los meses de primavera-verano. Sin embargo, en estos registros no se consideró que la tasa de muestras de MPS diario se estimó con base a distintos días de muestreo. En invierno, la tasa de MPS se calculó considerando aproximadamente un año, mientras que durante verano solo comprendió un mes. Lo anterior, no permite realizar comparaciones de concentraciones de MPS y mucho menos conocer su estacionalidad. Además, no se considera el error en las mediciones por posibles alteraciones en las concentraciones de MPS por viento y nieve. Las tasas diarias de MPS no sobrepasan el umbral de 200 mg/m2-día según los registros del titular. Sin embargo, no es posible saber concentraciones específicas diarias ni acumuladas en periodos regulares, los que podrían sobrepasar el umbral de afectación a glaciares definido por el titular. Respecto al periodo de revisita para recoger las muestras de MPS y la estimación de la tasa diaria de MPS. El proyecto Pascua-Lama consideró la recolección de muestras de MPS regular cada 30 días (Geoaire Limitada, 2015). En uno de los dos puntos cercanos al glaciar Guanaco se estimaron tasa de MPS entre 17 a 653 mg/m2-día (entre 2014-2015). Considerando el mismo punto de medición, si se contempla todo el periodo de muestreo (210 días) se hubiera estimado una tasa diaria de MPS equivalente a 201.2 mg/m2-día. Adicionalmente, el segundo punto de muestreo en el glaciar Guanaco hubiera mostrado una tasa diaria de MPS para todo el periodo de 12.2 mg/m2-día. Este caso muestra la alta variabilidad que produce el número de días considerados para realizar la toma de muestras de MPS en la tasa diaria de MPS, y que existe una gran diferencia en las concentraciones de MPS medidas en dos puntos asociados al mismo glaciar.

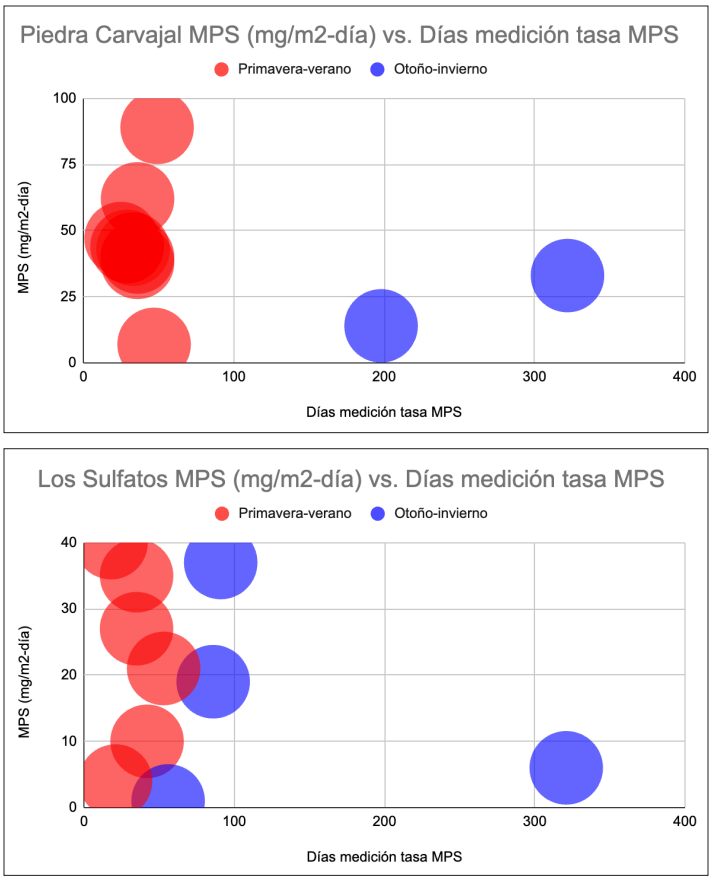


Figura 5. Relación entre la tasa de MPS y los días de medición considerados en la estimación de la tasa de MPS en los puntos Piedra Carvajal y Los Sulfatos.
Fuente: Elaboración propia con base en datos presentado en Figura A8, Anexos Línea Base de Calidad del Aire.

Respecto al cruce de datos de mediciones de concentración de MPS realizados en la subcuenca Estero Yerba Loca y la ejecución de tronaduras ocurridas en Los Bronces, no existe traslape de fechas entre registros. El Anexo C4-6 (Impacto por vibraciones a los glaciares), contiene una tabla que expone fechas de tronaduras y cantidad de explosivos utilizados entre la primavera 2018 y otoño 2019, mientras que los registros de concentraciones de MPS fueron tomados hasta abril de 2018. La autoridad no hizo mención a una posible correlación entre ambos datos y no solicitó registros de tronaduras desde el año 2016, fecha desde la cual el titular presentó datos de concentraciones de MPS.

d. Puntos de medición de MPS condicionados al viento local. Las mayores tasas de MPS fueron medidas durante primavera-verano en Piedra Carvajal, y durante primavera-verano y otoño-invierno en Los Sulfatos. Respecto a la velocidad del viento (Anexos Clima y Meteorología), se observó que Piedra Carvajal muestra la mayor intensidad en primavera-verano (octubre-marzo entre 10-17 hrs), influenciada mayormente por el viento catabático (viento que desciende desde el NO, velocidad máxima 40 km/h, Figura A10). Los Sulfatos, muestra la mayor intensidad del viento en otoño-invierno (marzo-septiembre en todo horario), influenciado también por el viento catabático (desde SE, velocidad máxima 65 km/h, Figura A11). Considerando estos antecedentes, es muy posible que las ráfagas de viento remuevan el MPS depositado en los contenedores durante primavera-verano en Piedra Carvajal y durante otoño-invierno en Los Sulfatos. Ambas estaciones se encuentran altamente influenciadas por el viento descendente, en el caso de Piedra Carvajal, viento proveniente desde la ubicación de los glaciares descubiertos, y en el caso de Los Sulfatos viento desde el glaciar rocoso Littoria.

e. Viento sinóptico-local y simulación de MPS. El estudio realizado por CECs (2017), estimó que los vientos de altura (viento sinóptico) fluyen de oeste a este durante todo el año (ubicación rajo abierto Andina y Los Bronces) hacia la ubicación de los glaciares de la cabecera de la cuenca Río Olivares. En tanto, el viento local, registrado en 8 estaciones ubicadas sobre glaciares y a un costado de estos, muestra una alta influencia de los

vientos catabáticos (que baja por la ladera), durante todo el año, con ráfagas de viento superiores a 43 km/h. La Figura 6 muestra un esquema conceptual de los vientos en superficie, en donde el viento local pasa desde la cuenca Río Blanco hacia las cuencas del Río Olivares y posiblemente a subcuenca Estero Yerba Loca, siguiendo patrones topográficos locales desde la divisoria entre las cuencas. Sin embargo, no han sido presentadas, por parte de la Línea Base o CECs (2017), mediciones de viento a la altura de los glaciares descubiertos (p. ej., Del Rincón y Paula) cerca de la divisoria entre subcuencas para corroborar paso de viento local.

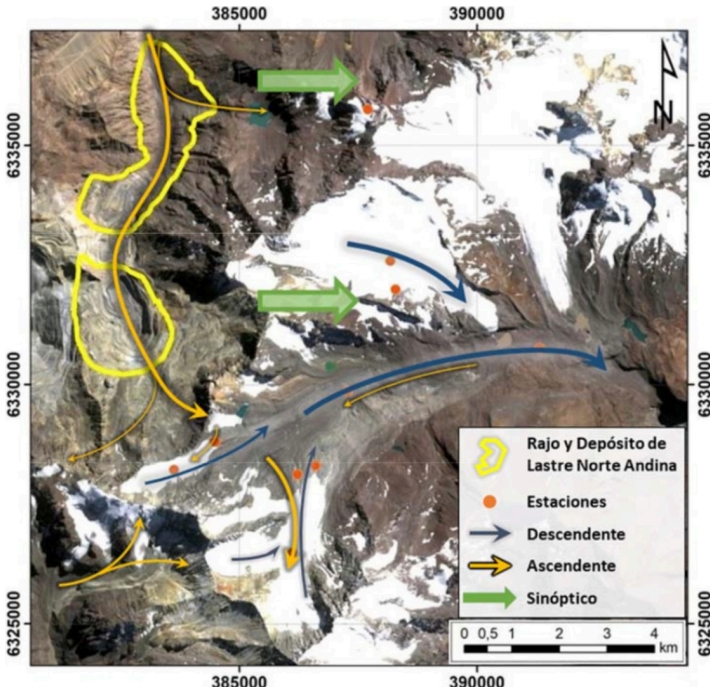


Figura 6. Esquema conceptual de vientos en la cuenca Río Olivares y Río Blanco.
En subcuenca Estero Yerba Loca no existen mediciones meteorológicas asociadas a los vientos ascendentes presentados (línea amarilla delgada). Los registros presentados en el Anexo de Clima y Meteorología señalan que los vientos dominantes (más frecuentes) son descendentes en la zona alta de la subcuenca Estero Yerba Loca.
Fuente: CECs (2017) en Anexo 3.11.

En tanto, la simulación de Calidad del Aire (Anexo C4-2), basó la simulación del viento sólo en la estación meteorológica Los Bronces, mostrando diferencias importantes entre los resultados de la simulación de dirección y velocidad del viento y las observaciones en términos de la distribución mensual y horaria. Por ejemplo, la dirección del viento simulada a los 350° muestra mayor frecuencia durante horas del día, pero las observaciones lo muestran durante la noche, demostrando errores importantes en la capacidad de pronosticar el viento por parte de la simulación. Respecto a velocidad del viento, las observaciones muestran mayor velocidad entre agosto-febrero (máximo cerca de 10 m/s), pero la velocidad modelada lo muestra entre julio y noviembre (máximo cerca de 8 m/s). Respecto al análisis de incertidumbre, se presenta una subestimación de la velocidad en 14%, considerando el promedio durante 2017, dejando de lado el número de datos considerados y rango de fechas, la estacionalidad y datos estadísticos relevantes como desviación estándar, sesgo y correlaciones, entre otros. Al no incorporarse la estacionalidad se podrían desestimar grandes errores que en su conjunto, promedio para todo el periodo, son compensados. En este contexto, CECs (2017) menciona que “a la hora de evaluar la procedencia del Material Particulado Sedimentable (MPS) de origen antrópico es importante tener en cuenta la variabilidad natural de vientos en la zona”. Sin embargo, durante la simulación no fue validada la dirección del viento en estación Los Bronces, y no se validó la simulación de viento en la subcuenca Estero Yerba Loca (estaciones meteorológicas de Piedra Carvajal y Los Sulfatos), considerando que estos registros fueron presentados en la Línea Base.

Respecto a la metodología de simulación de Calidad de Aire, se presentan datos estadísticos de concentraciones de MPS, sin incorporar número de días con registros, fecha de inicio y fin de registros, y si los valores de MPS son diarios o acumulados. Como se mencionó en el punto (c), las mediciones y metodología de medición de MPS son muy distintas y difícilmente comparables.

Respecto a los resultados de dispersión de MPS simulada (Figura 7), la media anual de MPS 2017 abarcaría a todos los glaciares del Estero Yerba Loca y la mayor parte de la superficie glaciar en Olivares. Los glaciares se encuentran entre las isolíneas de tasa de depositación 5 a 2 mg/m2-día (esto se presume, ya que no se indica la unidad en el documento o figura). En tanto, las concentraciones medidas promedio (máximas) 2017 para Piedra Carvajal y Los Sulfatos fueron 4 mg/m2-día (6 mg/m2-día) y 2 mg/m2-día (4 mg/m2-día), respectivamente. Llama la atención que las mayores concentraciones de MP2.5, MP10 y gases sean transportados hacia el oeste y no hacia el este, que es la dirección de los vientos en altura descritos por CECs (2017). Respecto a esto, la simulación de Calidad del Aire no indica si el transporte de MPS fue considerado a la altura del viento sinóptico, la elevación del viento local o si considera un promedio del MPS simulado en una columna de aire desde la superficie. El análisis del viento a distintas elevaciones es fundamental para comprender el transporte de MPS, sin embargo, el reporte de simulación de Calidad del Aire no lo menciona. Finalmente, tampoco fue descrita la implementación del modelo CALPUFF (para estimar MPS y otros). Respecto a todos estos antecedentes, la autoridad no hizo algún comentario en la RCA.

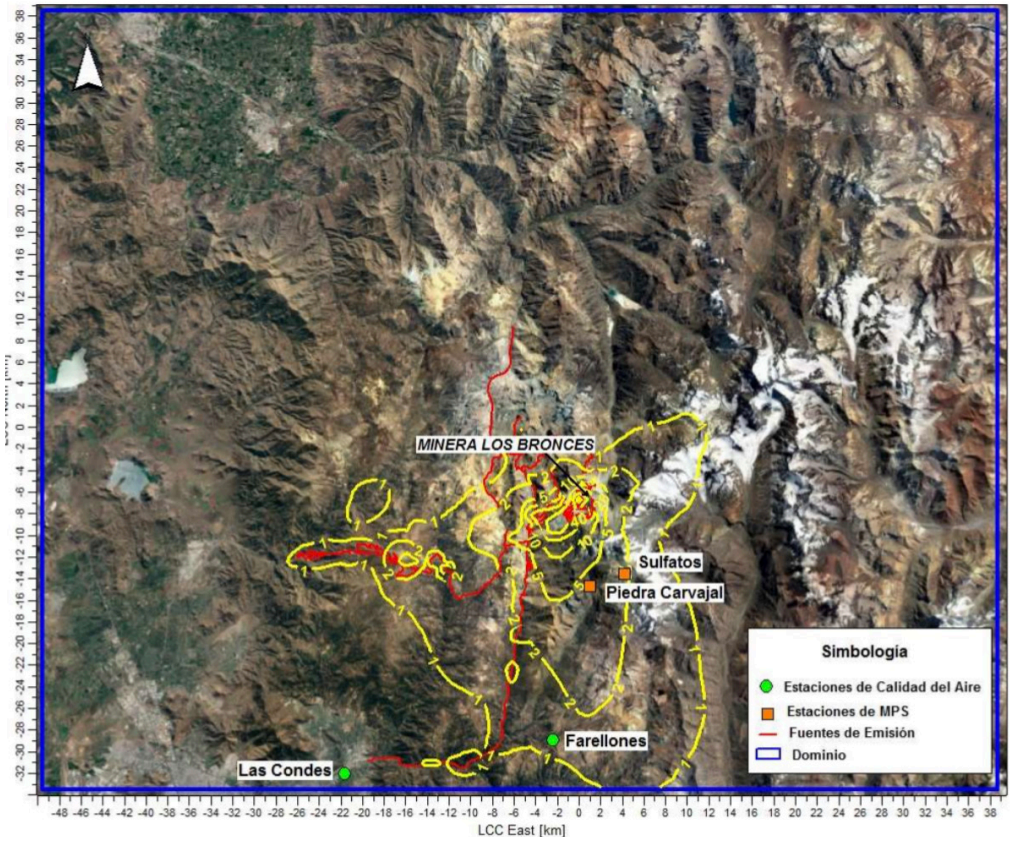


Figura 7. Isolínea de concentraciones de MPS media anual 2017. Es posible que las unidades de las isolíneas correspondan a mg/m2-día. La unidad no fue agregada en el Anexo.
Fuente: Informe de simulación de Calidad del Aire en Anexo C4-2.

f. Imposibilidad de rastrear el origen del MPS medido. El titular no realizó mediciones de química-mineralogía en las muestras de MPS, por lo que no se pudo distinguir, entre otros, la presencia de carbono negro. La empresa señaló que no existe evidencia del efecto del carbono negro en glaciares, descartando la posible afectación en glaciares por falta de estudios en la materia. Sin embargo, el origen químico-mineralógico del MPS permitiría rastrear su origen, el cual podría provenir, en distintos porcentajes, de laderas locales, actividad minera, y desde la ciudad de Santiago, entre otras fuentes emisoras. El titular solo midió MPS en términos de peso.

Estimación del umbral de MPS de afectación en glaciares de la subcuenca Estero Yerba Loca

En la RCA, el titular definió un umbral de MPS de afectación en glaciares de 200 mg/m2-día, punto desde el cual la ablación de la superficie glaciar comenzaría a ser afectada. Este cálculo de afectación de la ablación deriva de la estimación del albedo natural de glaciares ubicados en la zona central de Chile, estimado por CECs (2017). En primera instancia, el titular (Línea Base) mencionó que este umbral de MPS fue estimado con base a una norma Suiza de calidad del aire, sin embargo, en la Adenda menciona que este cálculo derivó del estudio realizado por CECs (2017) para CODELCO. Según la empresa, el umbral de MPS fijado por CECs (2017) fue de 206 mg/m2-día (acumulado anual de 75 g/m2, dentro del límite de variabilidad natural del albedo del 15%), por lo que el umbral establecido por el titular guardaría mayor precaución en el cambio de albedo y con ello en la ablación generada sobre glaciares.

A partir del análisis de la Línea de Base en sus informes y anexos, entre ellos, el estudio realizado por CECs (2017, Anexo 3.11-A), se han identificado inconsistencias metodológicas que permiten concluir que el umbral de MPS de afectación podría ser otro y que este no debe ser asociado con una tasa anual.
CECs (2017) estudió 18 glaciares descubiertos (superficie > 0.01 km2), de los cuales ni uno se encuentra al interior de la subcuenca Estero Yerba Loca, a pesar esto, los glaciares estudiados más cercanos fueron Paloma Norte y Olivares Alfa (Figura 8).

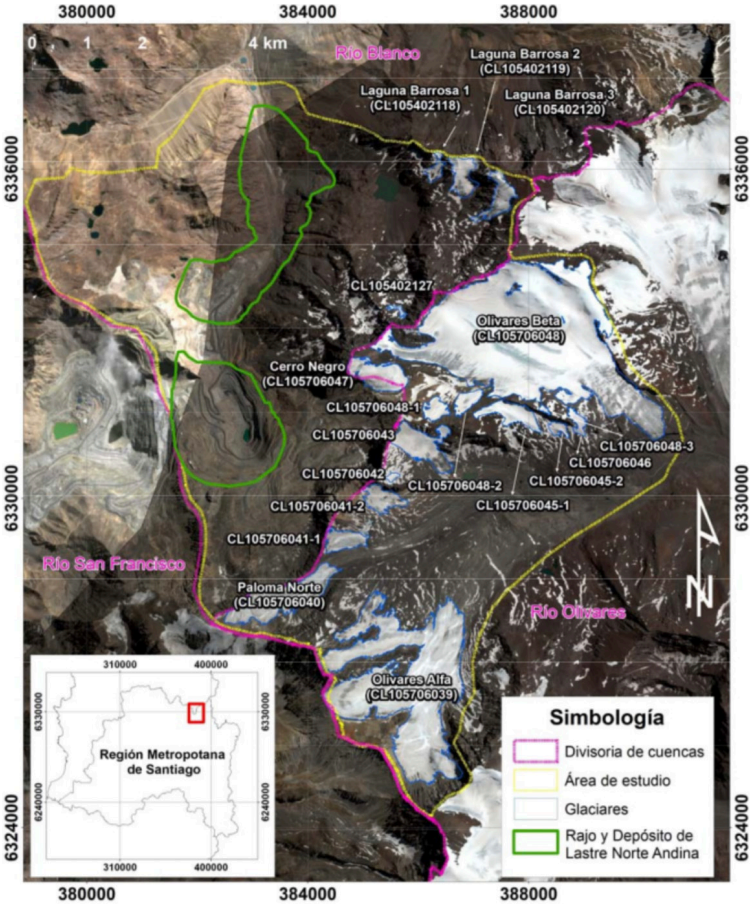


Figura 8. Ubicación de los 18 glaciares estudiados en CECs (2017), cercanos a glaciares de subcuenca Estero Yerba Loca.
Fuente: CECs (2017) en Anexo 3.11-A.

✻ Definición de variabilidad natural del albedo.

CECs (2017) definió en 15% la variabilidad natural del albedo glaciar, el cual corresponde al rango intercuartil promedio del albedo estimado en 4 años (2013-2017), considerando un rango de elevación aproximado entre 3600-6000 m s.n.m. de superficies glaciares en la zona Central de Chile y Argentina. Esto significa que el 15% de variabilidad del albedo está asociado a la mayor cantidad de superficie glaciar en un rango de elevación específico. Sin embargo, el porcentaje de superficie glaciar es diferente del número de glaciares, por lo que la variabilidad de albedo será distinta para glaciares en particular. Menciona que "Aunque hay variaciones locales, se puede afirmar con cierta confianza que la variabilidad natural del albedo en la región es en torno a un 15%". A pesar de lo señalado por CECs (2017), el albedo natural, puede ser entendido como la proporción de la energía incidente y reflejada en la superficie glaciar (CECs lo estimó en sobre hielo glaciar), y sin intervención antrópica directa o indirecta, lo cual en términos reales es imposible, considerando que en lugares tan remotos como la Antártica la nieve ha sido contaminada por residuos antrópicos (Aves et al., 2022). En este aspecto, el estudio no identificó ubicaciones de la actividad antrópica cercana a glaciares (p. ej., centros urbanos y áreas de extracción de roca-suelo), no rastreó el posible transporte de MPS desde estas fuentes y no extendió el estudio en un periodo histórico en el cual se conozca la nula o baja intervención directa/indirecta de la actividad antrópica en la zona central de Chile. Además, consideraron la estimación del albedo natural en sólo 4 años, rango de fecha insuficiente para conocer el estado real de la variabilidad del albedo. En este aspecto, CECs (2017) utilizó imágenes satelitales Landsat desde 2013, sin embargo, esta misión posee datos de la superficie terrestre desde la década de 1982 (ESA, 2024).

✻ Metodología de estimación de albedo en glaciares

(a) No existe análisis desagregado que identifique albedo en glaciares lejanos o cercanos a actividades antrópicas, estacionalidad y años secos/húmedos.
Basándose en el estudio satelital de glaciares ubicados entre el Ventisquero Gussfeldt al norte del Río Aconcagua (32.5°S) y el Volcán San José (33.9°S), en la cabecera del Maipo, y tanto en la vertiente chilena como en la argentina (ubicación de glaciares en Figura 9), se estimó el albedo considerando rangos de elevación. Sin embargo, no se conoce si el albedo estimado por rango de elevación corresponde a valores de cada píxel en superficie glaciar o al valor promedio de los píxeles por superficie de cada glaciar en los rangos de elevación. Distintas consideraciones podrían cambiar el rango mínimo y máximo de albedo estimado. Además, los registros tomados durante 4 veranos no permiten conocer la variabilidad del albedo anual o estacional, considerando que, para la zona central, los glaciares ganan masa por medio de la depositación de nieve (otoño-invierno) y la pierden a través de la ablación (como derretimiento y sublimación, primavera-verano). No es posible conocer el albedo en años húmedos/fríos o secos/cálidos. La superficie glaciar, en términos de área, asociada a valores de albedo no es identificada, como tampoco el número de glaciares. Todos estos antecedentes, son fundamentales para analizar posibles cambios en el albedo de los glaciares. La autoridad no hace mención a estos aspectos en la RCA.
A modo de ejemplo, el albedo registrado en diciembre 2016 (Figura 10) en el rango de elevación 3600 (albedo P50 = 0.25) y 6000 m s.n.m. (albedo P50 = 0.4) muestra un aumento hasta la elevación 5700 msnm (albedo P50 = 0.6), mostrando una variabilidad del albedo superior al 30% en varios rangos de elevación. En el caso de los glaciares de la subcuenca Estero Yerba Loca, estos datos de albedo permiten estimar una variación el albedo aproximado entre 20-29%, considerando superficies englaciadas entre los 3800-5000 m s.n.m. (albedo a los 3800 m s.n.m. P50=0.25, P75=0.3, con diferencia de 0.05 = 20%; albedo a los 5000 m s.n.m. P50=0.45, P75= 0.58, con diferencia de 0.13 = 29%). Este ejemplo demuestra que la estimación de la variabilidad del albedo de 15% puede variar al doble considerando los mismos registros para un mes específico. Sin embargo, los datos presentados en CECs (2017) no permiten desagregar el albedo para los glaciares de la subcuenca Estero Yerba Loca o alguna otra cuenca en particular.

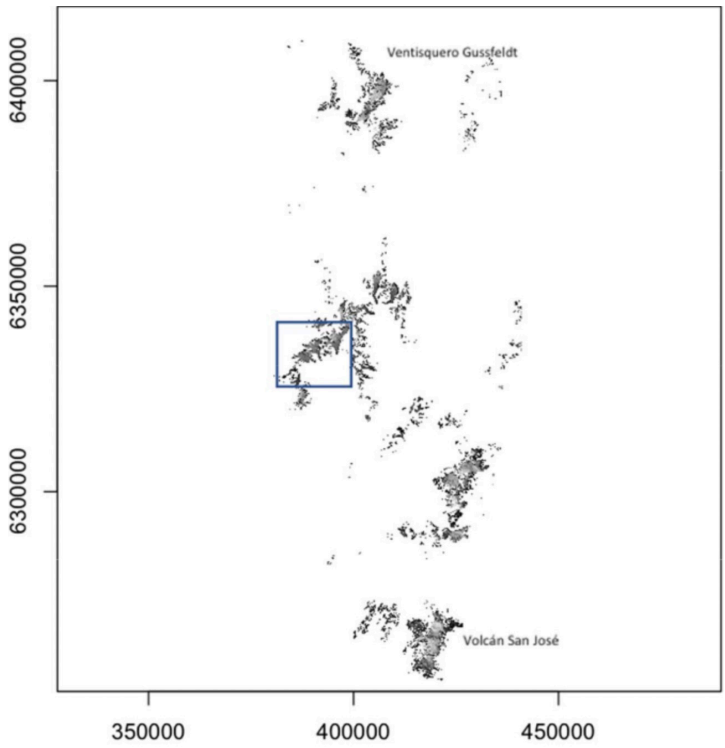


Figura 9. Glaciares estudiados para estimar la variabilidad natural del albedo en la zona central de Chile y Argentina. *Fuente: CECs (2017).*

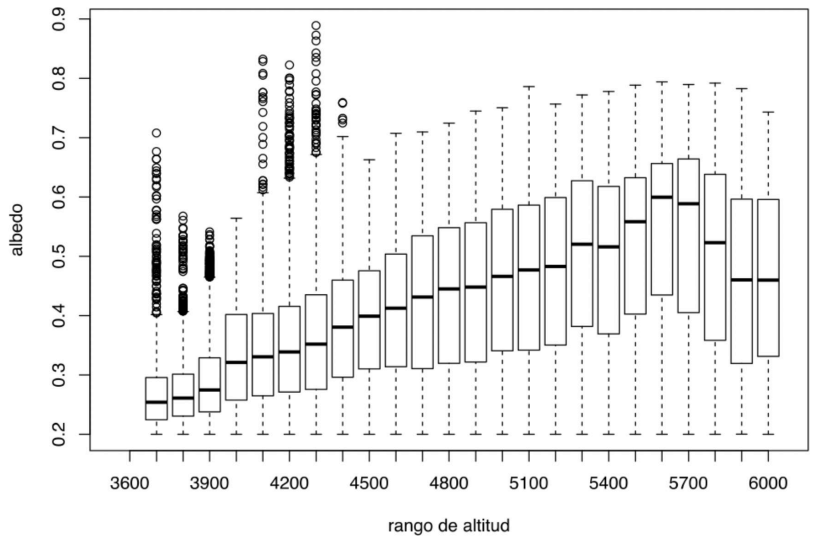


Figura 10. Variabilidad de albedo por rango de altitudes en los glaciares de la región comprendida entre el Aconcagua al norte y el Volcán San José al sur. Estimación a partir de la imagen Landsat de diciembre de 2016. *Fuente: CECs (2017).*

(b) Las fechas y datos utilizados en la estimación del albedo glaciar son insuficientes.

El albedo fue estimado a partir de imágenes satelitales Landsat 8 entre 2013-2017 (4 años) y durante la estación de verano, sin mencionar fechas específicas y número de datos por glaciar en cada rango de elevación (área glaciar o número de píxeles). Sin embargo, considerando el repaso del satélite (cada 16

días) y un incremento en el número de días nublados durante las estaciones de otoño-invierno (en esta zona), es posible considerar que la estimación de albedo, fue realizada principalmente para hielo. A lo anterior, se agrega que los años de análisis se encuentran dentro de un periodo prolongado de sequía (Garreaud et al., 2017). Además, los datos presentados por CECs (2017) (Figura 11), utilizados para justificar el 15% de variabilidad natural de albedo, no identifican el número de glaciares y la superficie considerada por rango de elevación. Por ejemplo, un rango de elevación baja podría considerar una superficie glaciar muy pequeña en comparación a un rango de elevación medio-alto, por lo que el umbral de 15% podría resultar de la misma ponderación para todos los rangos de elevación o ser representativo de la superficie glaciar en un rango de elevación medio-alto. La autoridad no hace mención a estos aspectos en la RCA.

Adicionalmente, no se realizó una validación del albedo satelital, considerando que CECs (2017) presenta la instalación de estaciones meteorológicas en cuenca Río Olivares, y que el albedo derivado desde imágenes satelitales incorpora una corrección atmosférica en donde la humedad y polvo en la atmósfera son los principales elementos a corregir. Por último, debido a la amplitud de la zona de estudio, la cual abarca diferentes elevaciones, condiciones topográficas y climáticas locales, el albedo podría cambiar por la ocurrencia de precipitaciones locales, ocasionando también cambios de albedo en distintas elevaciones de los glaciares (Shaw et al., 2020).

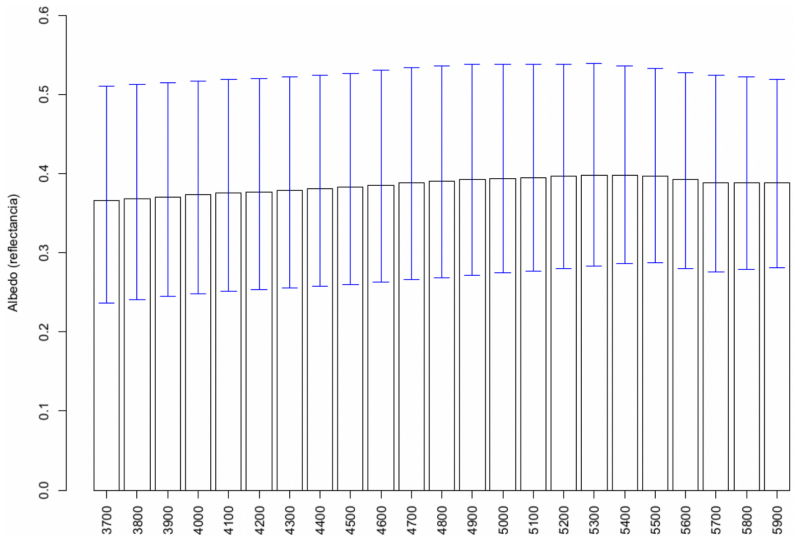


Figura 11. Variabilidad de albedo por rango de altitudes en los glaciares de la región, promedio de la mediana desde el año 2014 al año 2017. Las barras de error indican el rango intercuartil del percentil 25 al 75. *Fuente: CECs (2017).*

(c) Conclusiones basadas en supuestos sin mediciones o análisis expuesto.
CECs (2017) menciona que “Los glaciares no son sistemas aislados, sino que están influenciados por su entorno” debido a ello “se deriva que al menos la mitad de los glaciares de la región presentan una variabilidad del orden del 15%, incluso en zonas lejanas a cualquier posible influencia antrópica”, aseverando que “Esto indica que esa variabilidad se debe a causas naturales.” Sin embargo, también indican que “no puede descartarse que una variación de la reflectancia inferior al 15% sea simplemente por variabilidad natural. En el caso de una variabilidad local mayor es recomendable investigar si la causa es natural o por influencia humana”. A pesar de ello, CECs (2017) no proporciona la variabilidad de albedo por glaciar, si no que lo presenta para todos los glaciares de la zona central de Chile y Argentina, y tampoco por glaciares que podrían estar siendo afectados por actividades antrópicas. Además, menciona

que es necesario investigar el albedo glaciar en caso de variabilidad mayor, como podría estar ocurriendo en los glaciares de la subcuenca Estero Yerba Loca. Sin embargo, el titular no presentó estudios de albedo en glaciares descubiertos. La autoridad mencionó al titular su preocupación por no haberse incluido glaciares descubiertos en el estudio de la subcuenca Estero Yerba Loca, pero la empresa lo desestimó.

El estudio de CECs (2017) no incorporó mediciones in situ de albedo, MPS y mineralogía para caracterizar el albedo y rastrear el origen de partículas que lo podrían estar interviniendo. Sin embargo, menciona que "Aunque hay variaciones locales, se puede afirmar con cierta confianza que la variabilidad natural del albedo en la región es en torno a un 15%, y que variaciones de este rango son debidas a factores de tipo natural, como envejecimiento y metamorfosis de la nieve, acumulación de polvo en suspensión proveniente de laderas cercanas, afloramiento de sedimentos enterrados en el glaciar, etc."

* Definición umbral de MPS de afectación en ablación de la superficie glaciar.

El titular definió como umbral de afectación de la superficie glaciar un valor de 200 mg/m2-día (equivalente a 73 g/m2 acumulado anual), el cual podría alterar la variabilidad natural del albedo glaciar, estimado en 15%. Este valor es levemente más conservador que el estimado como referencia desde CECs (2017), el cual fue estimado para glaciares de la zona central de Chile-Argentina (206 mg/m2-día, equivalente a 75 g/m2 acumulado anual). Este umbral estimado por CECs (2017) es mencionado en la evaluación de impacto ambiental, sin embargo, este valor no aparece en el reporte de CECs (2017). Según CECs (2017) el valor umbral de afectación de MPS establecido que provocaría un cambio en el albedo natural estimado en 15% correspondería a un rango de MPS de 137 y 548 mg/m2-día para un año hidrológico, y el cual fue estimado para una superficie de nieve fresca.

Según CECs (2017), "La concentración de polvo en un volumen es un proceso lento y complejo, que depende de la acumulación total de nieve, los eventos puntuales de ablación/acumulación, el viento etc." Considerando una acumulación constante de MPS sobre la superficie glaciar, CECs (2017) señala que "en verano se iría lavando o se podría aglomerar. En verano, se concentraría en el fondo de penitentes (formas superficiales de hielo/nieve con forma de aguja desde algunos cm a varios metros de alto) si hay sublimación (proceso por el cual el glaciar pierde masa en condiciones atmosféricas de baja temperatura y bajo nivel de humedad, altas velocidades de viento y alta radiación solar) y en parte se lavaría si hay derretimiento. Si cae sobre hielo, parte de este polvo se lava y parte se aglomera (Adhikary et al., 2002); si hay sublimación, el polvo tiende a concentrarse; si hay fusión, parte del polvo se lava con el agua de escorrentía; y si se forman penitentes, el polvo tiende a concentrarse en el fondo de los mismos." A lo anterior agrega que debido a "Este comportamiento heterogéneo en la evolución del polvo sobre los glaciares, hace que sea difícil predecir la carga final de polvo en superficie a partir de la concentración (en peso)".

Considerando la explicación anterior, CECs (2017) indica que "si se asume que durante un año en la zona de estudio se podría acumular del orden de 0.5 a 2 m equivalente de agua," haciendo referencia a la acumulación de nieve durante el invierno, "esto equivaldría a que se requiere que se acumule en ese volumen un peso de 50 a 200 g de MPS total, para que se produzca un efecto sobre el albedo superior a la variabilidad natural media observada". Suponiendo que la superficie de depositación es 1 m2 y que corresponden a un valor acumulado anual, el umbral de MPS de afectación en tasa promedio diaria, entregado por CECs (2017), comenzaría desde los 137 mg/m2-día (correspondiente a 50 g/m2-año; donde 200 g/m2-año equivale a 548 mg/m2-día). Este umbral de afectación de MPS sería aplicable solo a un rango de las superficies glaciares (percentil 50), sobre la cual se estimó una variabilidad del albedo del 15%.

Fotografía: Claudio Santana.

Motivos para desestimar el uso del umbral de MPS en glaciares de la subcuenca Estero Yerba Loca

A continuación se resumen las inconsistencias metodológicas que desestiman el uso del valor umbral de afectación propuesto por el titular y su aplicación sobre los glaciares de estudio encontrados en la subcuenca Estero Yerba Loca.

Inconsistencia 1. De rango de albedo medido en nieve y hielo

El rango de albedo de nieve fresca estudiado y relacionado con peso de polvo en Painter et al. (2012) y Skiles et al. (2012) varía en el rango 0.5-0.95, cuya longitud de onda coincide con el rango del sensor OLI utilizado por CECs (2017) para estudiar el albedo (datos discretos) en la zona central de Chile-Argentina. Sin embargo, el albedo estimado para los glaciares por CECs (2017) entre 2014-2017 (Figura 11) varía entre 0.35 a 0.4 (P50), con valores máximos de 0.5 (P75). Estos valores de albedo medidos por CECs se encuentran asociados a hielo (0.34-0.51 según Cuffey & Paterson, 2010) y no a nieve fresca como la usada en el estudio de Painter et al. (2012) y Skiles et al. (2012). Además, este estudio muestra que para albedos de nieve fresca inferiores a 0.5, una concentración de 0 a 1000 ppmw se relacionaría al mismo comportamiento de albedo. Debido a lo anteriormente explicado, el valor umbral de afectación de MPS establecido en CECs (2017) de 137 y 548 mg/m2-día, y supuestamente derivado del estudio de Painter et al. (2012) y Skiles et al. (2012), no tendría el mismo efecto en superficie de hielo glaciar.

Inconsistencia 2. De falta de mediciones in situ (p. ej., albedo) e impactos en tasa de ablación

La estimación del umbral de MPS que afecta el albedo glaciar, fue realizada de manera simplificada y sin considerar las condiciones específicas de los glaciares de la zona central de Chile-Argentina. Algunos aspectos

fundamentales y no considerados en la estimación de CECs (2017) son: (a) falta de mediciones in situ para estimar relación entre la concentración de polvo, el cambio de albedo relacionado en superficie glaciar y su efecto en la tasa de ablación (derretimiento y sublimación); (b) no se estudia la redistribución de polvo depositado en la superficie glaciar durante las distintas temporadas y su agregación a polvo de años anteriores; (c) no se consideran efecto de distintas concentraciones de polvo en diferentes tipos de superficie glaciares (rugosidad superficial) y tipos de densidad de nieve a hielo glaciar; (d) no se considera el efecto que podría provocar una misma concentración de polvo en la superficie glaciar pero compuesto por distinta mineralogía, por ejemplo carbono negro.

Inconsistencia 3. De superficie glaciar no representativa

El estudio CECs (2017) estimó una variabilidad del albedo del 15% aplicable sobre la superficie de glaciares sobre un rango de elevación extenso, y representativa un rango de superficie glaciar asociada al percentil 50 y no de un número conocido o asociado de glaciares. Estos glaciares no son identificados en CECs (2017) para cuencas o subcuencas específicas. Considerando estos antecedentes y el efecto de MPS sobre nieve fresca, fue estimado el peso mínimo de MPS (137 mg/m2-día) que podría provocar un cambio mayor a la variabilidad del albedo del 15%, medido principalmente en hielo glaciar y no en nieve fresca.

Área influencia de umbral de afectación de MPS sobre glaciares definido por Anglo American

Queda desestimada el área de influencia de la isolínea de MPS umbral de afectación y del valor de umbral de MPS de afectación sobre glaciares debido a las numerosas inconsistencias metodológicas identificadas. Entre estas inconsistencias se encuentran la metodología de medición y posterior análisis, y la falta de mediciones específicas que permitan conocer el efecto de la tasa de depositación de MPS sobre la superficie de glaciares descubiertos. Estas inconsistencias se detallan a continuación:

- Sólo se midió viento en 2 puntos al interior de la subcuenca Estero Yerba Loca. Lo que impide conocer la dinámica del viento distribuido, desconociéndose ésta sobre los glaciares y cómo se comportan los vientos locales entre subcuencas.

- La simulación del viento en un área extensa y montañosa fue validada solamente en una estación meteorológica, sin embargo, en esta (Los Bronces) no fue validada la dirección del viento simulada. La validación no mostró buenos resultados en términos de velocidad diarios y estacional en la estación Los Bronces. La simulación del viento no fue validada al interior de la subcuenca Estero Yerba Loca, lo cual permitiría conocer el grado de error de la simulación y su transporte o no hacia glaciares.

- Existe una alta incertidumbre en la dirección del viento de la zona y transporte del peso de MPS, considerando que los resultados de la simulación de calidad del aire muestran transporte de MPS hacia el oeste (p. ej., MPS y gases), mientras que CECs (2017) señala que el viento sinóptico tiene dirección hacia el este. La simulación de viento no indica la elevación de la dirección del viento estimado.

- La metodología de toma de concentraciones de MPS y su análisis no permiten una comparación temporal entre ellas y no es representativa del MPS que podría depositarse o mantenerse sobre la superficie de los glaciares.

- El albedo satelital estimado en CECs (2017) no fue validado con datos in situ y no es representativo de las condiciones anuales o de verano en la zona central de Chile y Argentina. Por lo que la estimación de albedo natural promedio del 15% no puede ser utilizada como valor único sobre los glaciares de la subcuenca Estero Yerba Loca.

- No existen mediciones in situ que comprueben el efecto del MPS en la superficie glaciar (en el albedo y cambio de tasa de ablación) y el origen del MPS en los estudios realizados por CECs (2017) o realizados por el titular. El umbral de afectación de MPS propuesto por el titular no es representativo de los glaciares de la subcuenca y no puede descartar afectación de la superficie glaciar, debido a inconsistencias metodológicas de alto impacto en los resultados.

3.6. Impactos ambientales por intervención en la calidad del agua superficial y subterránea identificados en la RCA

Posibles efectos en la calidad del agua subterránea son identificados en el impacto n°11 “Efecto adverso sobre el recurso agua por la alteración de la calidad fisicoquímica de aguas subterráneas por las obras subterráneas”. El titular señaló que el proyecto ha sido diseñado para no generar descargas al ambiente y considera recircular, durante la construcción, todas las aguas que se utilicen. Durante la operación, todas las aguas serán recirculadas al interior de Los Bronces subterráneo. En el cierre la alteración de las aguas tendrá como límites el muro cortafugas en la microcuenca La Disputada y el dominio primario en la subcuenca Estero Yerba Loca.
En tanto, en agua superficial, se consideran posibles efectos adversos por disminución de los aportes de flujos subterráneos al agua superficial en la subcuenca Estero Yerba Loca. Sin embargo, en el dominio primario no existe recarga de agua, así como tampoco transferencia hacia la superficie, por lo cual no existe influencia de procesos de alteración superficial que eventualmente podrían modular variaciones de caudal por aporte subterráneo.

La Adenda señala lo siguiente: Respecto a la estabilidad química del rajo, el plan de cierre de la operación Los Bronces, considera el tratamiento de las aguas de contacto en la microcuenca La Disputada mientras sea necesario, de manera de alcanzar un equilibrio fisicoquímico en el punto de monitoreo de salida de la microcuenca. Mientras que la subcuenca Estero Yerba Loca no muestra formación de nivel freático a la elevación en la que se emplazarán las obras. Respecto a las aguas superficiales, se presenta un Plan de Seguimiento Voluntario cuenca alta del estero Yerba Loca – Calidad de aguas Superficial (Fase de Operación).

3.7. Análisis crítico de los impactos ambientales por intervención en la calidad del agua superficial y subterránea identificados en la RCA

El titular señaló la posible intervención en la calidad del agua superficial por la alteración de la calidad fisicoquímica de aguas subterráneas (impacto n°11), debido a las obras subterráneas. Sin embargo, el titular señala que no es posible que esto ocurra, debido a que durante las fases del proyecto, todas las aguas que se utilicen tendrán como límites el dominio primario en la subcuenca Estero Yerba Loca. Debido a que no existe recarga en el dominio primario, como tampoco transferencia hacia la superficie, no existiría influencia en los procesos superficiales que pudieran modular variaciones de caudal por aporte subterráneo. Los posibles impactos en la variación del régimen hídrico podrían generarse sólo debido a cambios en los glaciares, como respuesta a la depositación de MPS asociados a glaciares. Sin embargo, y considerando los estudios entregados por el titular, referidos a Calidad del Agua superficial, Hidrología, Glaciares, Clima y Meteorología y Calidad del aire, y el análisis presentado en la RCA por la autoridad, no fue considerado el efecto que pudiera presentar la depositación de MPS sobre la nieve. Tampoco fueron considerados los efectos del cambio de régimen hídrico en la calidad del agua superficial de la subcuenca Estero Yerba Loca, y su interacción con el estero San Francisco y Río Molina, los que en su conjunto componen la escorrentía del Río Mapocho.

Antecedentes de la interacción del agua de deshielo y calidad del agua

El titular menciona que la variabilidad de calidad de agua en las subcuencas altas del río Mapocho (Esteros Yerba Loca y San Francisco, y río Molina) se debe principalmente al comportamiento de la calidad de aguas proveniente del Estero Yerba Loca. Se observó que todos los parámetros químicos y de calidad cambian desde el Estero Yerba Loca hacia el Río Mapocho (Estación Mapocho en los Almendros), debido principalmente a que el Río Molina aporta mayor caudal con una buena calidad, diluyendo las aguas provenientes de los esteros San Francisco y Yerba Loca. Cuando el caudal proveniente del Estero Yerba Loca, antes de la junta con el Río San Francisco, supera o iguala el caudal del Río Molina, provoca un aumento en la acidez (pH bajo) en el Río Mapocho. Este comportamiento es presentado en la Figura 12 durante los meses de enero y febrero de 2017.

La acidez de las aguas en la parte alta del Estero Yerba Loca proviene de la interacción de estas con zonas de alteración hidrotermal durante primavera-verano (ricas en hierro, aluminio y cobre). La baja acidez durante el invierno, se atribuye a la presencia de nieve en la zona, disminuyendo la interacción agua-roca. Sin embargo, la acidez aumenta cuando comienzan los deshielos en la zona. En la Figura 12 se observa un aumento de acidez asociado al aumento de los caudales por deshielo, incluso durante eventos puntuales de precipitación. Estos eventos de precipitación en primavera-verano, que cubren temporalmente la zona alta de la cuenca con nieve, pueden producir cambios en la tendencia de la acidez del estero. En verano, debido a la alta acidez del Estero Yerba Loca, las aguas solo se neutralizan luego de la confluencia con el Río Molina, presentando valores normalmente bajos (pH = 5) aguas arriba de la confluencia (valores por debajo del límite de la norma chilena de calidad del agua, NCh 1333).

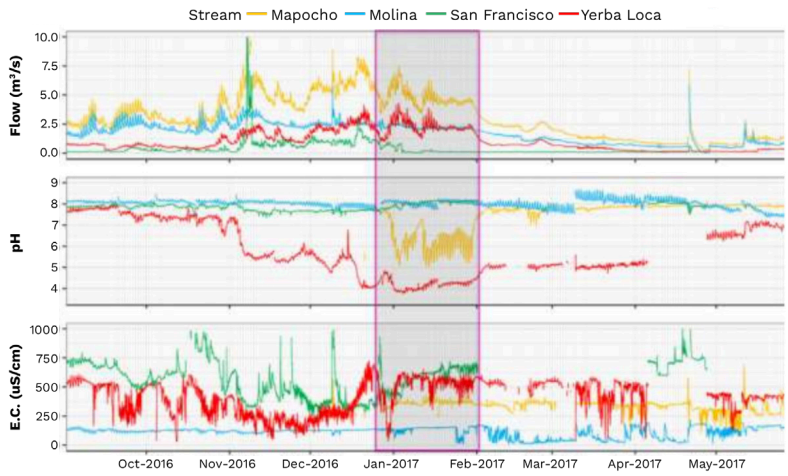


Figura 12. Medición continua de caudal, pH y conductividad eléctrica en afluentes de la cuenca alta Mapocho entre septiembre 2016 y mayo 2017, específicamente Río Mapocho (amarillo), río Molina (azul), río San Francisco (verde), Estero Yerba loca (rojo). *Fuente: Línea Base Calidad del Agua Superficial.*

Considerando los antecedentes de la Línea Base Hidrología, el régimen nivo-glaciar de la subcuenca Estero Yerba Loca es corroborado a partir de la presencia de la línea de nieve (2000-2015) variable entre los 1500 y 4500 m s.n.m. entre invierno y verano, respectivamente. La nieve puede cubrir toda la cuenca en invierno. Sin embargo, la elevación de la línea de nieve ha aumentado en tasas de 10-30 m/año desde el año 2000 (30-36°S), asociada a una reducción de la precipitación e incremento de la temperatura (Saavedra et al., 2018).

Considerando la distribución de las superficies de las subcuencas que componen la cuenca Río Mapocho en distintas elevaciones en la Figura 13, se observa que sobre la elevación de la línea de nieve a la elevación de la zona de Piedra Carvajal (3000 m s.n.m.), se encuentran los puntos de medición asociados a las muestras más ácidas de nieve (pH < 4, E-1, E-A4, E-A5, E-A6 y E-6). A partir de los 3000 m s.n.m. las superficies entre las subcuencas Estero Yerba Loca y Río Molina son similares, sin embargo, la superficie en subcuenca Estero Yerba Loca es mayor a la de la cuenca Río Molina a partir de los 3500 m s.n.m. (asociada también a la elevación del frente de los glaciares).

Considerando estos antecedentes, entre ellos la superficie distribuida con presencia de nieves-glaciares , el régimen hídrico, y el nivel de acidez del agua en las subcuencas Estero Yerba Loca y Río Molina, como también los discutidos en este reporte, se proponen 2 escenarios de afectación del régimen hídrico del Estero Yerba Loca y su impacto en el Río Mapocho. Estos escenarios son sugeridos en el contexto de que los antecedentes presentados en la evaluación ambiental del proyecto Los Bronces Integrado, no han comprobado la no afectación por polvo sobre glaciares o nieves en la subcuenca Estero Yerba Loca. Además, han sido consideradas las advertencias de CECs (2017) sobre cambios en la tasa de ablación de nieve producto de la depositación de polvo.

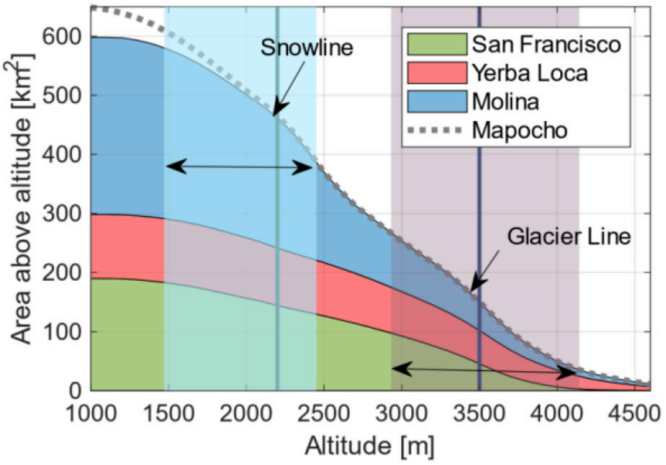


Figura 13. Hipsometría de la cuenca del Mapocho Alto y sus subcuencas. La línea de nieves varía típicamente entre 1500 a 2500 m s,n.m. con una media de 2200 m s.n.m. (Garreaud, 2013). La línea de glaciares corresponde a la media anual de la isoterma 0ºC, esta línea varía estacionalmente entre los 3000 (invierno) y 4250 m s.n.m. (verano) (Carrasco, Casassa, & Quintana, 2005). *Fuente: Valenzuela (2021)*

Escenario 1.

Adelanto del máximo de escorrentía por aceleración de fusión de nieve debido a la reducción del albedo superficial por depositación de MPS y su efecto en la calidad del agua del Río Mapocho.

Durante el invierno, se esperaría una depositación regular de polvo proveniente de Los Bronces sobre la cobertura de nieve debido a flujos de viento local, la cual se ocultaría gradualmente debido a la ocurrencia de precipitaciones de nieve. Con la llegada de la primavera, el aumento de la radiación solar y la temperatura causarían el derretimiento de la nieve, cuya tasa de ablación se incrementaría por la reducción del albedo de la nieve debido a la presencia de polvo depositado. A medida que la capa de nieve pierde espesor, por el avance del derretimiento, se irían exponiendo capas de polvo (depositadas desde inicios del otoño), las cuales se sumarían a capas de polvo recientes (depositadas hacia fines del invierno). Hasta este punto, se podría considerar que la depositación de polvo presente en la cobertura de nieve debido a su derretimiento, desde inicios de la primavera, ha incremen-

tado y con ello han incrementado las tasas de ablación de la nieve hasta inicios del verano. Además, la humedad de la nieve superficial no permitiría la extracción del polvo desde la capa. Considerando que el subsuelo estaría saturado de agua durante la primavera, el agua proveniente del derretimiento de nieve llegaría rápidamente a la salida de la cuenca.
A modo de ejemplo, el Estero Yerba Loca muestra un caudal máximo estacional en el mes de diciembre (~2 m3/s (2016-2018), asociado a un caudal de ~3 m3/s medido en el Río Molina ese mismo mes. El adelanto del caudal máximo en Estero Yerba Loca en 1 mes (noviembre) coincidiría con un caudal del Río Molina mayor que el registrado en diciembre (~4 m3/s en noviembre) (Figura 3). Sin embargo, el máximo nivel de acidez en Estero Yerba Loca es registrado en enero, el cual se podría adelantar hacia el mes de diciembre, afectando también en ese mes la calidad del agua en el río Mapocho, aumentando su acidez.

Escenario 2.

Posible acidificación del Río Mapocho debido al aumento de la tasa de ablación glaciar por depositación prolongada de MPS

En la subcuenca Estero Yerba Loca, entre 1955 a 2020, los glaciares aceleraron su retroceso, encontrándose los cambios más abruptos desde 2010 (Marangunic et al., 2021). Durante el periodo 2012-2020, también se ha registrado que la mayor contribución hídrica proviene de los glaciares descubiertos/cubiertos y luego del glaciar rocoso Littoria (Marangunic et al., 2021), la cual ha incrementado aunque condicionada a años más húmedos (Figura A4). Este aumento en la contribución hídrica de los los glaciares a los ríos de montaña, fue estimada para la cuenca del Río Maipo, incluida la cuenca Río Mapocho (Caro et al., 2024).

En este contexto, la posible depositación de polvo proveniente de Los Bronces, acumulado sobre la superficie de nieve en invierno, podría depositarse sobre la superficie de hielo glaciar una vez derretida la nieve, provocando una reducción del albedo del hielo glaciar. A este eventual depósito de polvo estacional se sumaría la posible depositación de polvo durante el verano, periodo en que el hielo glaciar está descubierto de nieve. A esta depositación de polvo anual y cuyo límite de afectación intentó ser justificado por el titular, se sumaría el polvo ya depositado sobre el hielo glaciar desde años anteriores. Como consecuencia, las superficies no cubiertas por detritos rocosos de los glaciares podrían estar acumulando polvo en superficie, a distintas tasas estacionales y anuales, posiblemente afectado la tasa de ablación desde escalas estacional, anual e interanual. Adicionalmente, es posible que la distribución de las concentraciones de polvo en la superficie glaciar sean removidas o reconcentradas debido a procesos glacio-hidro-climáticos que ocurren en ella.

Una eventual aceleración de la tasa de ablación de los glaciares en la subcuenca Estero Yerba Loca, podría ocasionar:

- Un incremento de la tasa de retroceso de los glaciares, sumada al efecto de la megasequía, lo que expondría mayor superficie rocosa y detrítica a los elementos meteorológicos.

- La escorrentía de verano en Estero Yerba Loca podría incrementar, principalmente desde los glaciares Paula Oeste y Este como también de la superficie descubierta del glaciar Del Rincón, cuyas superficie son las que contribuyen mayor cantidad de agua de fusión respecto a los demás presentes en la subcuenca.

- Considerando que los puntos de muestreo de calidad de agua en la subcuenca muestran mayor acidez en la zona alta (elevación > 3000 m s.n.m.), donde habría una mayor exposición de superficies antes englaciadas y que la disponibilidad de agua aumentaría durante el verano, más agua de fusión nieve/hielo entraría en contacto con las zonas de alteración hidrotermal. El titular no definió la distribución espacial de las zonas hidrotermales en la subcuenca Estero Yerba Loca. El conjunto de estos eventos provocaría una prolongación de los niveles de acidificación de las aguas registradas en enero. Esto aumentaría la probabilidad de acidificar el Río Mapocho, considerando una mayor contribución del caudal proveniente desde el Estero Yerba Loca respecto al proveniente del Río Molina en verano.

Fotografía: Claudio Santana.

4.

Consideraciones finales

DR. ALEXIS CARO
ABRIL 2024
CIUDAD DE PARRAL

La Resolución de Calificación Ambiental (RCA) del 2 de mayo de 2022 recomendó rechazar el proyecto Los Bronces Integrado (LBI), identificando 10 impactos ambientales relacionados con posibles cambios en el volumen y la calidad fisicoquímica del agua. Estos impactos estuvieron relacionados con los efectos que podría ocasionar la ejecución del proyecto a cielo abierto y subterráneo: (i) en los glaciares y su contribución hídrica a los flujos de agua (debido a la deposición de MPS y vibraciones) y (ii) en los flujos de agua subterránea y superficial, así como en su calidad fisicoquímica.

✻ Relevancia de los glaciares de la subcuenca Estero Yerba Loca en la escorrentía del Río Mapocho

Aunque el titular dice que el volumen de agua proveniente de los glaciares de la subcuenca Estero Yerba Loca no es relevante para el Río Maipo, se argumenta que la subcuenca contribuye primero al Río Mapocho, un tributario del Maipo. La estacionalidad de la contribución hídrica de los glaciares sugiere que esta es más relevante durante los meses de verano. El estudio de Marangunic et al. (2021) muestra que la subcuenca Río San Francisco, que incluye al Estero Yerba Loca, tiene la mayor superficie glaciar del Río Mapocho siendo vital su contribución hídrica al río. Además, se señala que la contribución hídrica de los glaciares ha aumentado en los últimos años, especialmente durante la megasequía, lo que realza su importancia para el caudal de verano en el Río Mapocho.

✻ Inconsistencias metodológicas para definir área de afectación de glaciares por MPS

Fueron observadas deficiencias en las mediciones de MPS y de viento, como también en la simulación del viento y transporte de MPS. El titular estableció un umbral de afectación de MPS en glaciares, basado en el cambio del albedo, el cual presenta inconsistencias en su cálculo y falta de representatividad para los glaciares estudiados. En simulación de transporte de MPS y viento, como en la estimación de albedo satelital y su impacto en la ablación glaciar, no existe una evaluación respecto a datos in situ. Se concluye que el umbral de afectación de MPS propuesto por el titular no puede ser aplicado a los glaciares encontrados en la subcuenca Estero Yerba Loca debido a la falta de antecedentes, por lo que los glaciares si podrían ser afectados por la depositación de MPS proveniente del proyecto Los Bronces Integrado, entre otros.

✻ Consecuencias en la calidad del agua debido a cambios en la tasa de ablación de nieve y hielo producto de la depositación de MPS

El titular destaca la variabilidad de la calidad del agua en las subcuencas altas del río Mapocho, atribuyendo principalmente los cambios a la influencia del Estero Yerba Loca. La calidad del agua cambia desde los esteros hacia el Río Mapocho, especialmente cuando el caudal del Estero Yerba Loca supera al del Río Molina, lo que aumenta la acidez del río Mapocho. En un escenario con depositación de polvo en nieve/hielo proveniente de Los Bronces, se podría afectar la fusión de la nieve, adelantando el aumento de la acidez en el caudal de verano. Además, un escenario de retroceso glaciar acelerado también podría contribuir a la acidificación del agua del Río Mapocho, prolongando el periodo de niveles altos de acidez. Ambos escenarios sugieren una posible influencia indirecta de la actividad minera en la calidad del agua de la cuenca del Río Mapocho a corto (estacional) y largo plazo (años).

✻ Falta de voluntad en la indentificación de impactos ambientales de la actividad minera en glaciares, y en su medición y análisis

El titular presentó una serie de reportes para descartar el efecto de la actividad minera en la subcuenca Estero Yerba Loca. Los procesos ambientales fueron caracterizados por diversas consultoras, careciendo de un análisis integrado de los procesos y posibles impactos indirectos provocados por la actividad minera. Estos procesos fueron estudiados específicamente desde distintas disciplinas, limitando el conocimiento por posibles cambios en su dinámica particular. Esta falta de análisis integral es un acto premeditado, que imposibilita conocer el impacto de la actividad minera sobre glaciares y cobertura de nieve. Por ejemplo, los glaciares fueron caracterizados en términos de su contenido de hielo y abarcando aspectos que permiten conocer su dinámica. Sin embargo, el efecto de la depositación de MPS en las superficies de los glaciares no fue medido. Debido a ello, no es posible asociar cambios en la tasa de MPS con cambios de albedo y montos de derretimiento de nieve y hielo en la superficie glaciar. Además, el estudio de posibles impactos en glaciares tuvo como objetivo el estudio de glaciares con un bajo porcentaje de hielo (glaciares rocosos), de los que se conoce su baja relevancia en el régimen hídrico de la subcuenca Estero Yerba Loca. En cambio, los glaciares descubiertos, de los que se conoce una rápida respuesta estacional y con ello en el régimen hídrico, no fueron estudiados. El procedimiento llevado a cabo en el estudio de los glaciares y la falta de estudios del efecto de MPS en la cobertura de nieve, demuestran la nula intención del titular por conocer la posible intervención que tiene la actividad minera en los procesos criosféricos que alimentan con agua al Estero Yerba Loca.

Fotografía: Claudio Santana.

5.

Referencias

DR. ALEXIS CARO
ABRIL 2024
CIUDAD DE PARRAL

- Aves, A. R., Revell, L. E., Gaw, S., Ruffell, H., Schuddeboom, A., Wotherspoon, N. E., LaRue, M., & McDonald, A. J. First evidence of microplastics in Antarctic snow. The Cryosphere, 16(6), 2127–2145. https://doi.org/10.5194/tc-16-2127-2022, 2022.
- Ayala, Á., Farías-Barahona, D., Huss, M., Pellicciotti, F., McPhee, J., and Farinotti, D. Glacier Runoff Variations 600 since 1955 in the Maipo River Basin, Semiarid Andes of central Chile. Cryosphere Discuss. 14, 1–39. https://doi:10.5194/tc-2019-233, 2020.
- Ayala, Á., Pellicciotti, F., Peleg, N., and Burlando, P.: 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, https://doi.org/10.1017/jog.2017.46, 2017.
- Carrasco, J. F., Casassa, G., & Quintana, J. Changes of the 0°C isotherm and the equilibrium line altitude in central Chile during the last quarter of the 20th century. Hydrological Sciences Journal, 933-948. doi:10.1623/hysj.2005.50.6.933, 2005.
- Caro, A. et al. Hydrological response of Andean catchments to recent glacier mass loss, The Cryosphere, 18, 2487–2507, https://doi.org/10.5194/tc-18-2487-2024, 2024.
- CECS. Anexo 3.11 de la Evaluación Ambiental del proyecto Los Bronces Integrado, 2017.
- Cuffey, K., & Paterson, W. The Physics of Glaciers (4th ed.). Burlington, MA: Elsevier, 2010.
- DEVINE J., RICHARD H., BEEK H., MEYER A., DUVALL W. Effect of charge weight on vibration levels from quarry blasting. Report of investigation 6774, 1960.
- DGA. Plan estratégico de la gestión hídrica en la cuenca del Maipo, S.I.T. 471, 2021.
- DGA, https://dga.mop.gob.cl/Paginas/InventarioGlaciares.aspx, 2014.
- ESA. https://earth.esa.int/eogateway/missions/landsat-4-and-landsat-5, 2024.
- Garreaud, R. Warm Winter Storms in Central Chile. Journal of Hydrometeorology, 1515-1534. doi:10.1175/JHM-D-12-0135.1, 2013.

- Garreaud, R. D., Alvarez-Garreton, C., Barichivich, J., Boisier, J. P., Christie, D., Galleguillos, M., LeQuesne, C., McPhee, J., and Zambrano-Bigiarini, M.: The 2010–2015 megadrought in central Chile: impacts on regional hydroclimate and vegetation, Hydrol. Earth Syst. Sci., 21, 6307–6327, https://doi.org/10.5194/hess-21-6307-2017, 2017.

- Geoaire. Informe mediciones de material particulado sedimentable (MPS) proyecto Pascua Lama, primer semestre 2015. https://snifa.sma.gob.cl/SeguimientoAmbiental/Ficha/35654, 2015.

- Ladanyi, B. Bearing Capacity of Strip Footings in Frozen Soils. Canadian Geotechnical Journal. 12(3): 393-407. https://doi.org/10.1139/t75-043, 1975.

- Marangunic C., Ugalde F., Apey A., Armendáriz I., Bustamante M. and Peralta C. Ecosistemas de montaña de la cuenca alta del río Mapocho, Glaciares en la cuenca alta del río Mapocho: variaciones y características principales. AngloAmerican - CAPES UC, 2021.

- Painter, T. H., Skiles, S. M., Deems, J. S., Bryant, A. C., & Landry, C. C. Dust radiative forcing in snow of the Upper Colorado River Basin: 1. A 6 year record of energy balance, radiation, and dust concentrations. Water Resources Research, 48(7), 1–14. https://doi.org/10.1029/2012WR011985, 2012.

- Prieto, A.F., Cantor, L.C., y Rodríguez, C.E. Modelo de bloque deslizante para analizar el comportamiento cinemático de deslizamientos en suelos a partir de las fuerzas resultantes de un modelo de equilibrio límite. Obras y proyectos, (27), 64-77. https://dx.doi.org/10.4067/S0718-28132020000100064, 2020.

- Saavedra, F. A., Kampf, S. K., Fassnacht, S. R., & Sibold, J. S. Changes in Andes snow cover from MODIS data, 2000–2016. The Cryosphere, 12(3), 1027–1046. https://doi.org/10.5194/tc-12-1027-2018, 2018.

- Shaw TE, Ulloa G, Farías-Barahona D, Fernandez R, Lattus JM, McPhee J. Glacier albedo reduction and drought effects in the extratropical Andes, 1986–2020. Journal of Glaciology. 67(261):158-169. doi:10.1017/jog.2020.102, 2021.

- Skiles, S. M., Painter, T. H., Deems, J. S., Bryant, A. C., & Landry, C. C. Dust radiative forcing in snow of the Upper Colorado River Basin: 2. Interannual variability in radiative forcing and snowmelt rates. Water Resources Research, 48(7), 1–11, 2012.

- Valenzuela, M. Water quality in the upper mapocho river basin (santiago, chile): implications for environmental management in the overlap between a natural protected area and the world's greatest known copper deposit, Universidad de Chile, 2021.

Fotografía: Claudio Santana.

6.

Anexos

DR. ALEXIS CARO
ABRIL 2024
CIUDAD DE PARRAL

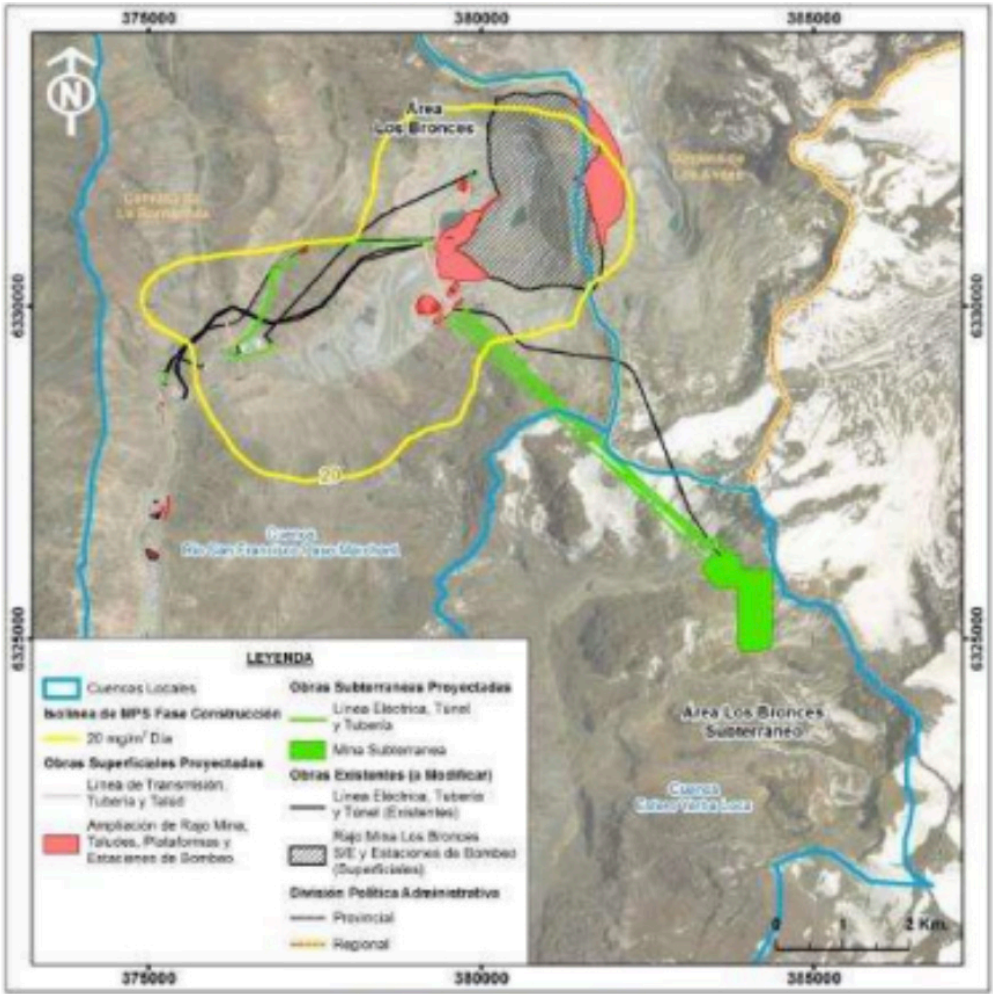


Figura A1. Isolínea de depositación límite para evaluar impactos en glaciares por MPS.

Fuente: Capítulo 4 EIA

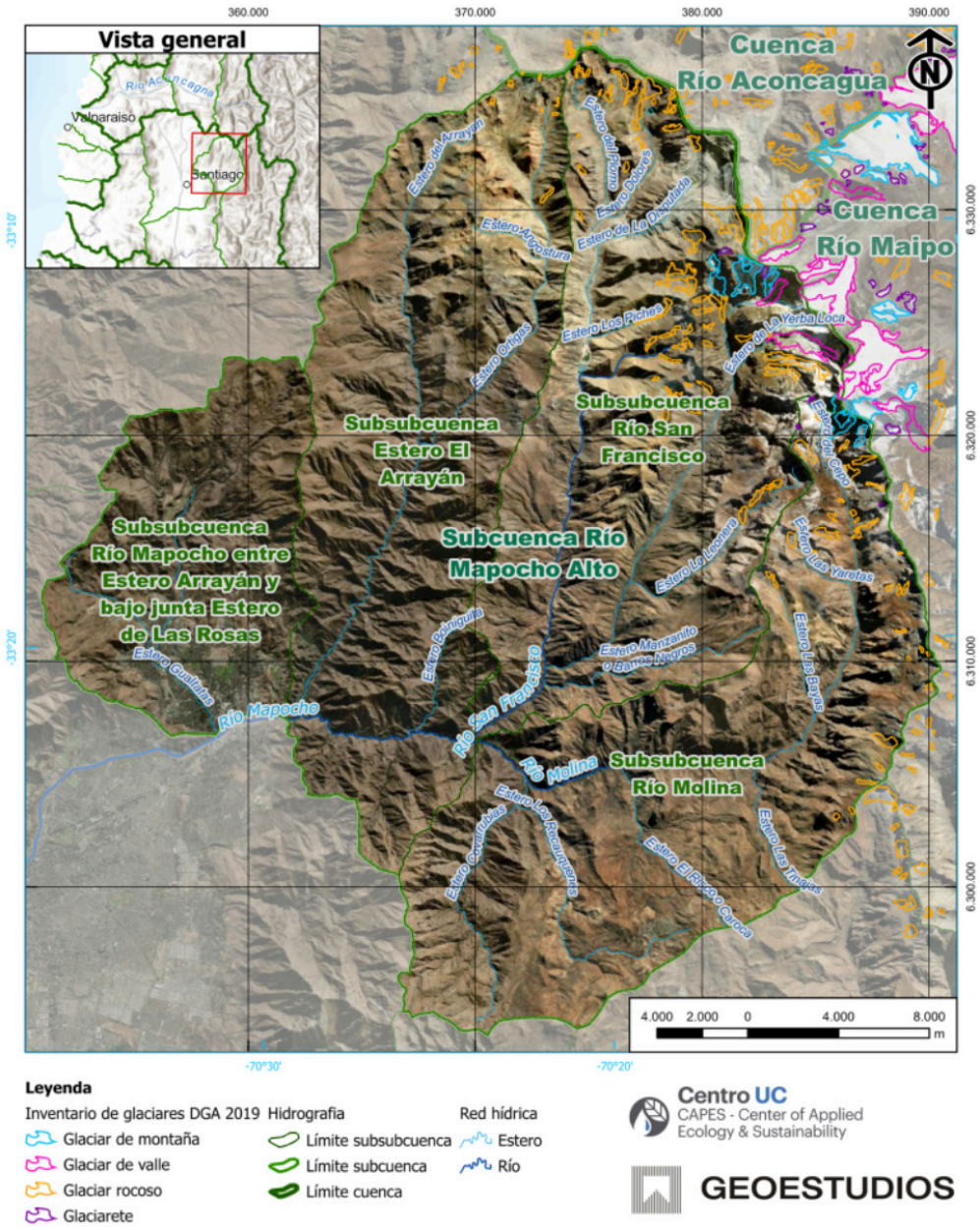


Figura A2. Inventario de glaciares en la cuenca Río Mapocho (zona coloreada). Sectores con líneas de colores indican los distintos tipos de glaciar de acuerdo a la DGA (2019).

Fuente: Marangunic et al. (2021).

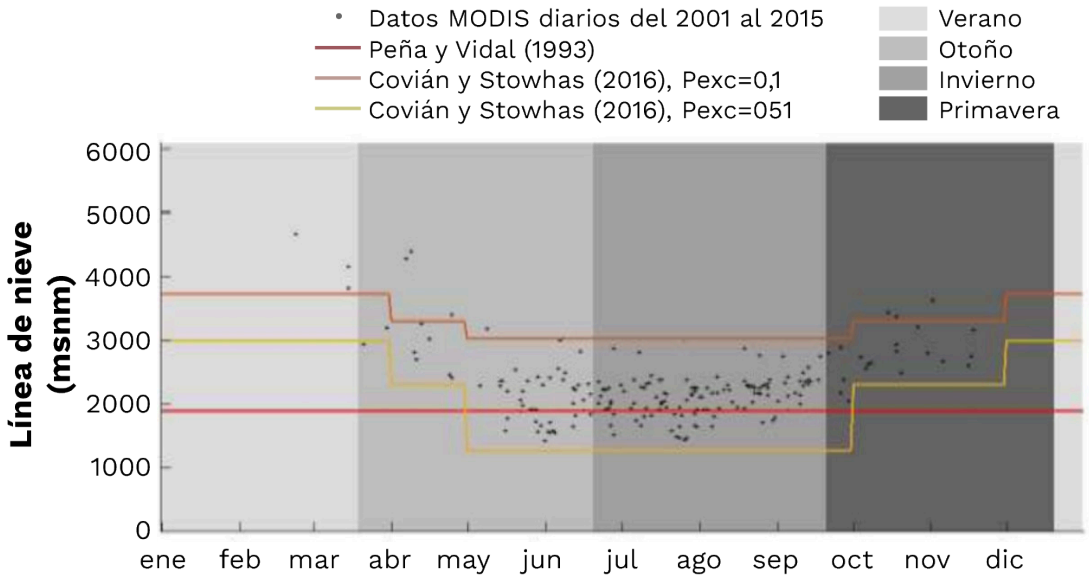


Figura A3. Línea de nieve de la cuenca Río Mapocho.

Fuente: Línea Base Hidrología en Figura HI-5.

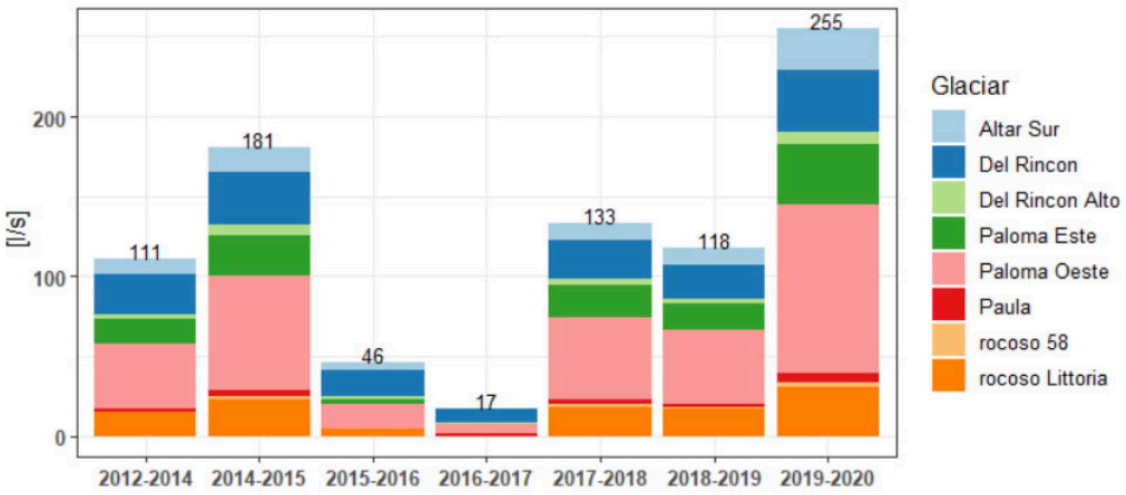


Figura A4. Caudal medio anual de los glaciares de la subcuenca Estero Yerba Loca derivado del balance de masa geodésico desarrollado por la consultora Geoestudios Asesores S.A. para Anglo American.

Fuente: Marangunic et al. (2021).

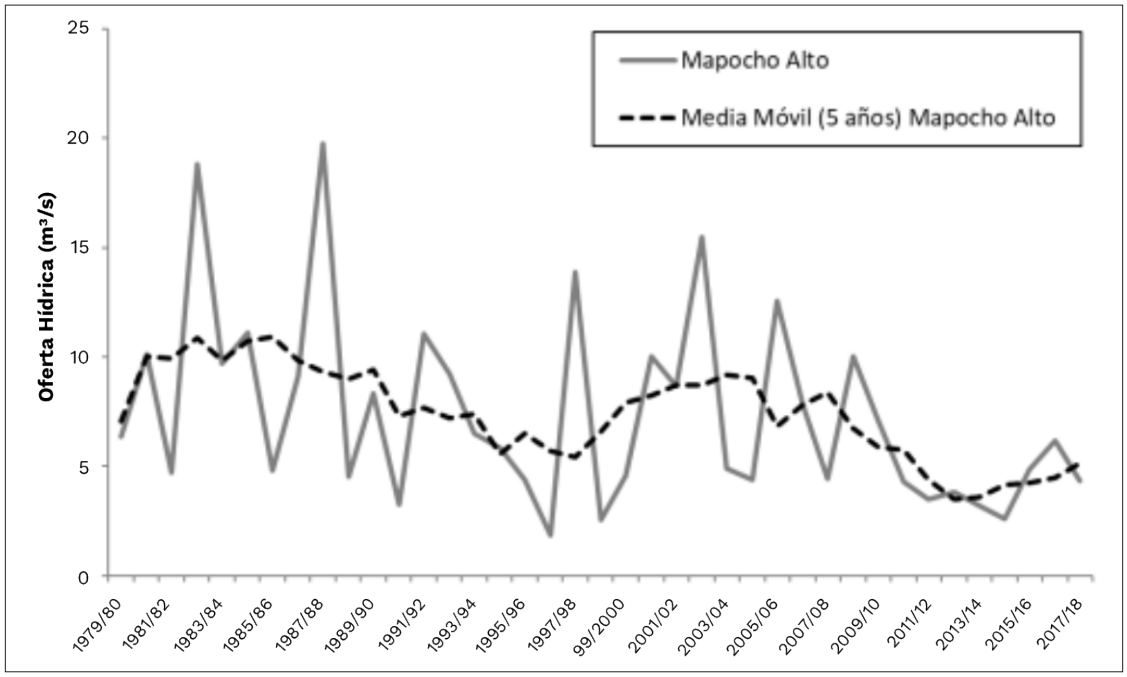
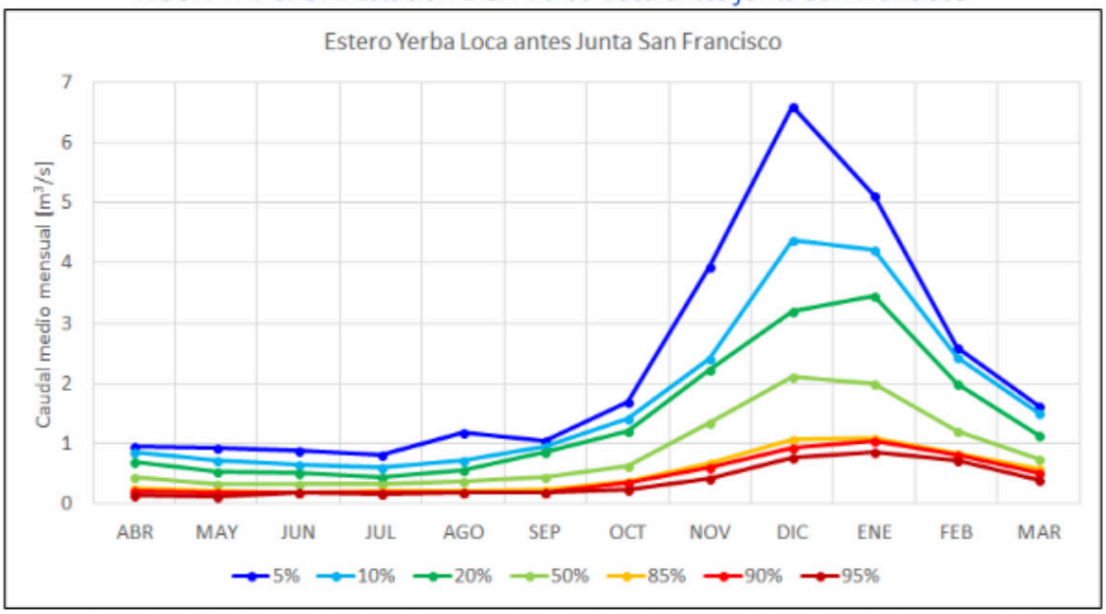


Figura A5. Variación temporal de la oferta hídrica para el periodo 1979/1980-2017/2018 En el río Mapocho Alto, con régimen natural.

Fuente: DGA (2021) en Figura 4-10.

FIGURA HI-8: CVE Estación DGA Yerba Loca antes junta San Francisco



Fuente: Estudio de Anglo American Sur de caracterización hidrológica asociada a las subsubcuencas Río Blanco, Estero Yerba Loca y Río San Francisco. 2018

TABLA HI-14: Pexc Qmm Estación DGA Yerba Loca antes junta San Francisco

Pexc	Abr (m^3/s)	May (m^3/s)	Jun (m^3/s)	Jul (m^3/s)	Ago (m^3/s)	Sep (m^3/s)	Oct (m^3/s)	Nov (m^3/s)	Dic (m^3/s)	Ene (m^3/s)	Feb (m^3/s)	Mar (m^3/s)
5%	0,96	0,92	0,91	0,81	1,16	1,05	1,68	3,86	6,44	5,10	2,60	1,62
10%	0,84	0,71	0,64	0,61	0,65	0,97	1,41	2,40	4,38	4,18	2,44	1,50
20%	0,69	0,54	0,52	0,51	0,51	0,85	1,19	2,22	3,19	3,44	1,95	1,13
50%	0,45	0,35	0,34	0,34	0,37	0,49	0,69	1,29	1,89	1,91	1,20	0,74
85%	0,28	0,24	0,21	0,23	0,21	0,26	0,38	0,70	1,09	1,10	0,86	0,53
90%	0,26	0,22	0,20	0,21	0,20	0,20	0,36	0,62	0,94	1,05	0,83	0,49
95%	0,17	0,21	0,19	0,18	0,19	0,19	0,23	0,43	0,79	0,86	0,73	0,33

Fuente: Estudio de Anglo American Sur de caracterización hidrológica asociada a las subsubcuencas Río Blanco, Estero Yerba Loca y Río San Francisco. 2018.

Figura A6. Curva de Variación Estacional de Estación DGA Yerba Loca antes junta San Francisco.

Fuente: Línea Base de Hidrología

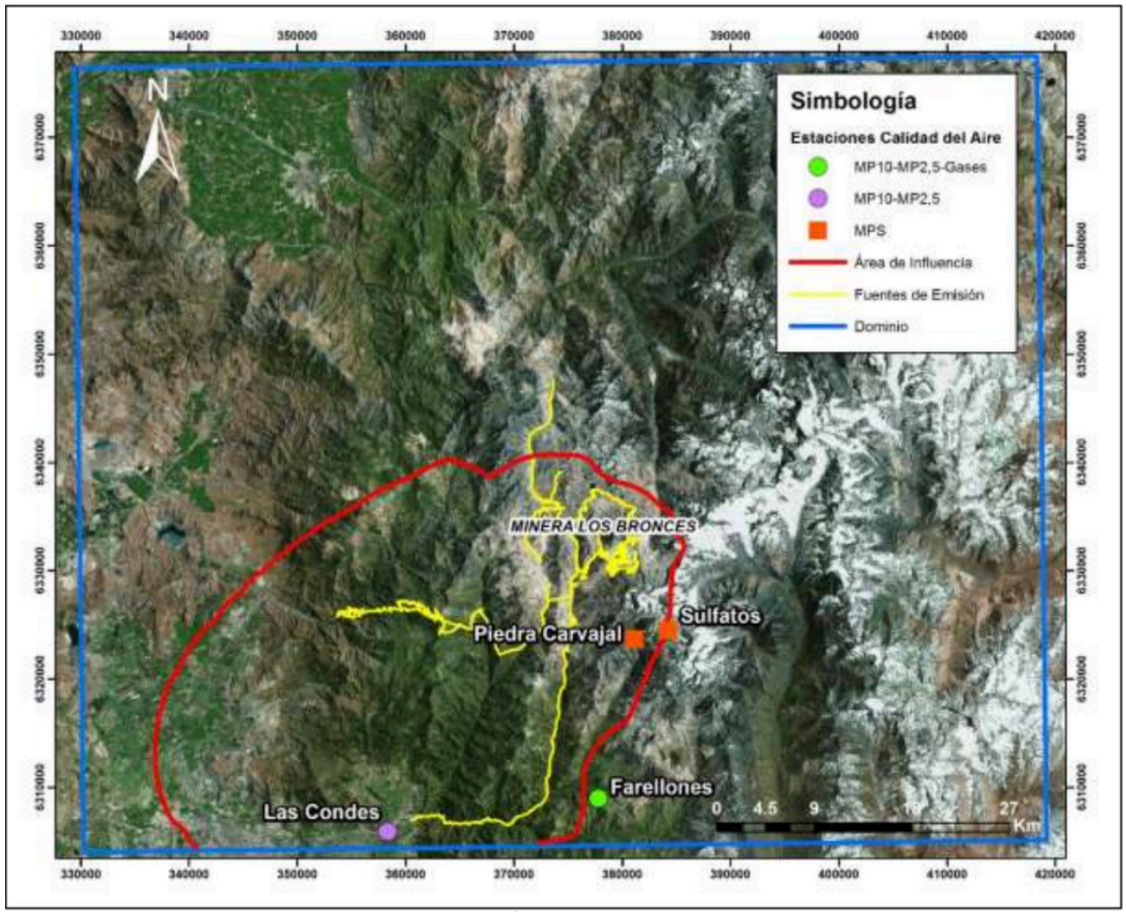


Figura A7. Estaciones de monitoreo de meteorología y de MPS.

Fuente: Anexos de Línea Base Calidad de Airea en Figura 1.1

Tabla I.11: Tasas de Depositación de MPS (mg/m2-día), estación Piedra Carvajal.

FECHA INSTALACIÓN	FECHA RETIRO	MPS (mg/m2-día)
27/01/2016	16/03/2016	88,7
16/03/2016	30/09/2016	14,0
30/09/2016	04/11/2016	62,2
04/11/2016	21/09/2017	33,4
21/09/2017	06/11/2017	6,6
06/11/2017	04/12/2017	43,8
04/12/2017	08/01/2018	38,0
08/01/2018	12/02/2018	40,3
12/02/2018	08/03/2018	47,2
08/03/2018	09/04/2018	43,0
Promedio de la Tasa de MPS		**41,7**

Tabla I.12: Tasas de Depositación de MPS (mg/m^2-día), estación Sulfatos.

FECHA INSTALACIÓN	FECHA RETIRO	MPS (mg/m^2-día)
03/02/2016	16/03/2016	9,9
16/03/2016	10/06/2016	18,7
10/06/2016	05/08/2016	1,4
05/08/2016	04/11/2016	37,4
04/11/2016	21/09/2017	5,8
21/09/2017	13/11/2017	20,8
13/11/2017	04/12/2017	4,3
04/12/2017	08/01/2018	26,5
08/01/2018	12/02/2018	34,5
12/02/2018	08/03/2018	40,1
Promedio de la Tasa de MPS		**19,9**

Figura A8. Tasas de depositación de MPS en Piedra Carvajal y Los Sulfatos entre 2016-2018

Fuente: Anexos Línea Base de Calidad del Aire en Tablas I.11 y I.12

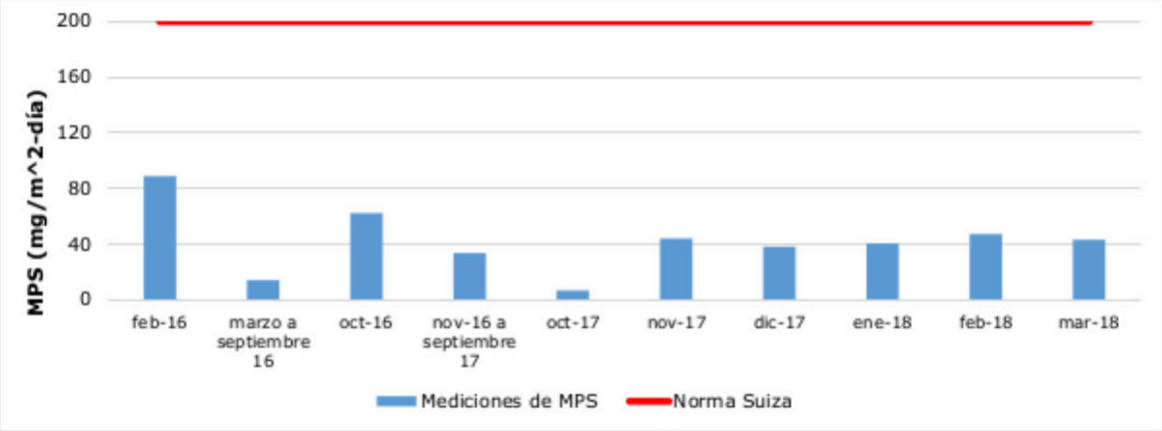


Figura 1.21: Tasas de Depositación de MPS (mg/m²-día), estación Piedra Carvajal.
Fuente: Elaboración Propia.

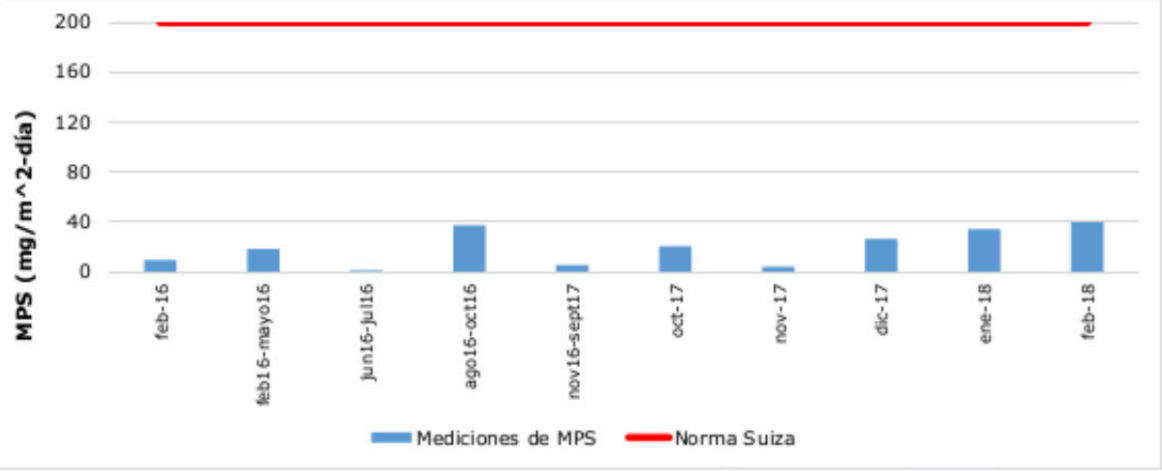


Figura 1.22: Tasas de Depositación de MPS (mg/m²-día), estación Sulfatos.
Fuente: Elaboración Propia.

Figura A9. Tasas de depositación diaria de MPS medidas en subcuenca Estero Yerba Loca entre 2016 y 2018.

Fuente: Anexos Línea Base de Calidad del Aire.

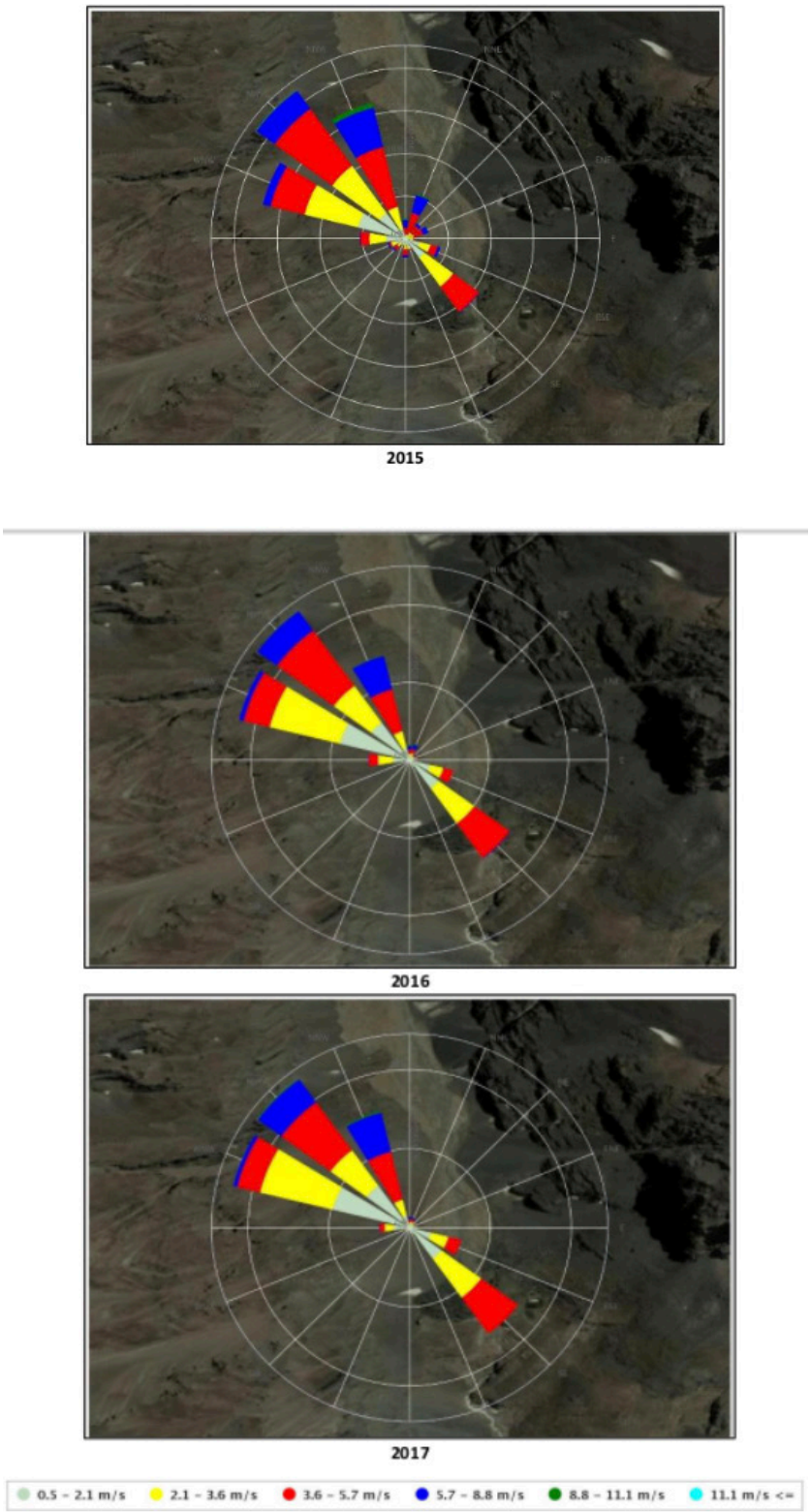


Figura A10. Rosas de los vientos en estación Piedra Carvajal entre 2015-2017

Fuente: Anexos de Línea Base de Clima y Meteorología en Figura 3.11

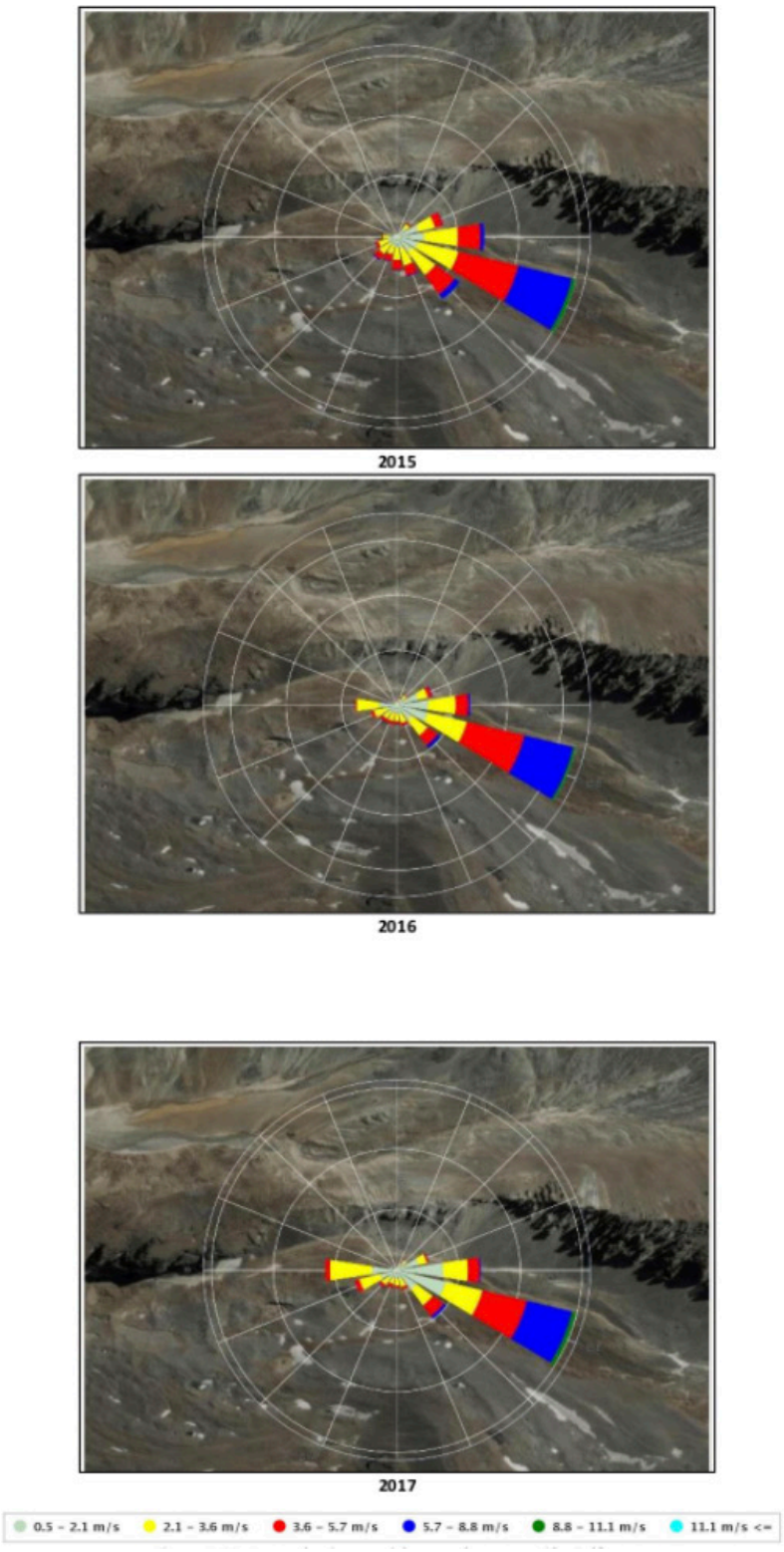


Figura A11. Rosas de los vientos en estación Sulfatos entre 2015-2017

Fuente: Anexos de Línea Base de Clima y Meteorología en Figura 3.21

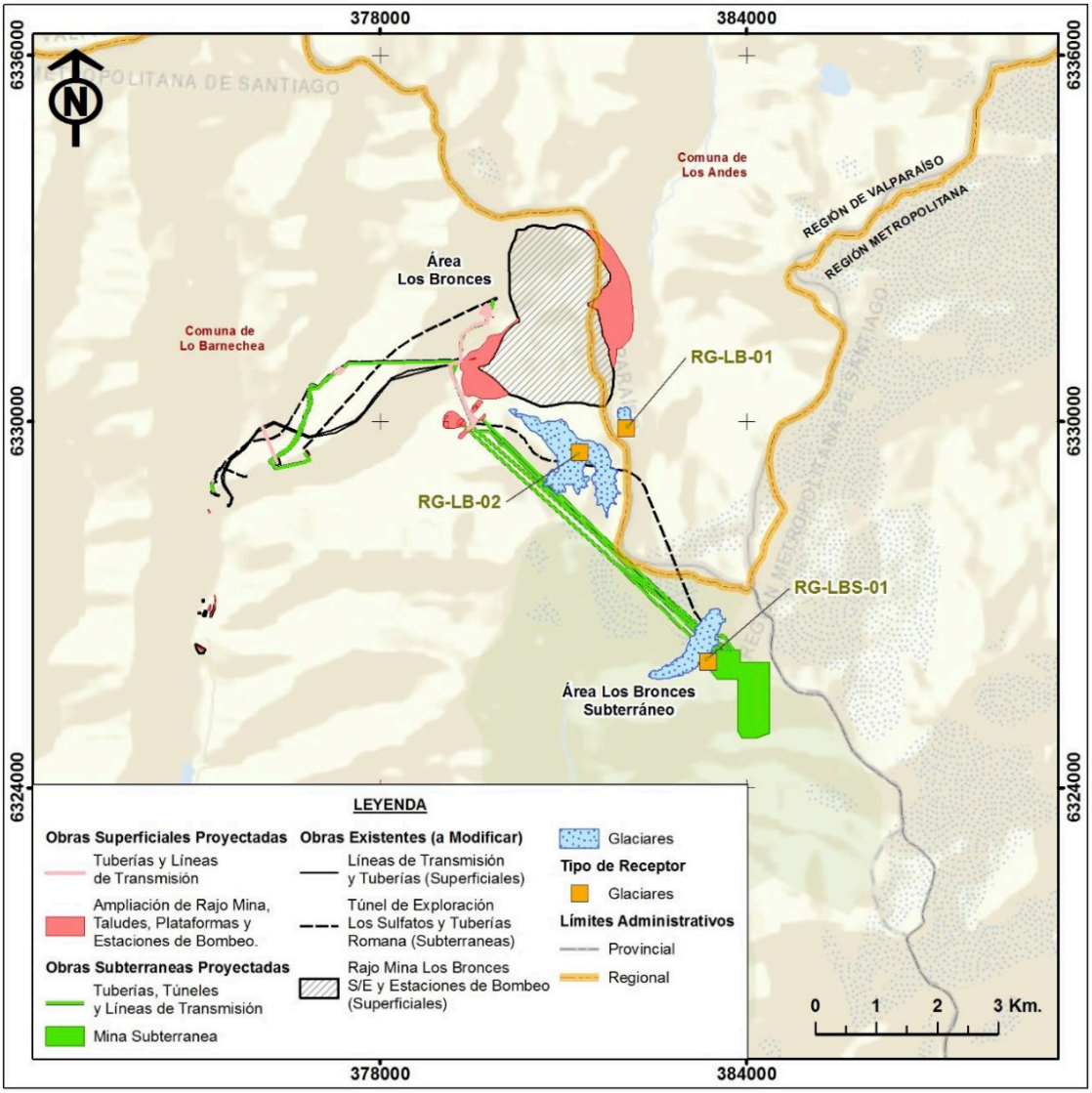


Figura A12. Ubicación de los puntos representativos de los receptores glaciares del componente niveles de vibraciones en aire.

Fuente: Línea Base Vibraciones

Análisis crítico del EIA del proyecto Los Bronces Integrado:

IMPACTOS SOBRE LA HIDROLOGÍA

DR. ALEXIS CARO

ABRIL 2024,
CIUDAD DE PARRAL

GREENPEACE