



**GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCION GENERAL DE AGUAS**

MONITOREO DE DETALLE INTENSIVO DEL GLACIAR PRINCIPAL DEL COMPLEJO VOLCÁNICO NEVADOS DE CHILLÁN, REGIÓN DE ÑUBLE, MACROZONASUR, 2021-2022

REALIZADO POR:

DEPARTAMENTO DE GEOGRAFÍA DE LA UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

S.I.T. N° 529

SANTIAGO, AGOSTO DE 2022

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

Ministro de Obras Públicas

Arquitecto Sr. Juan Carlos García

Director General de Aguas

Ingeniero Civil Sr. Rodrigo Sanhueza Bravo

Jefe Unidad de Glaciología y Nieves

Ingeniero Civil Hidráulico Dr. Gino Casassa Rogazinski

Inspector Fiscal

Ingeniero Civil Hidráulico Dr. Gino Casassa Rogazinski

DEPARTAMENTO DE GEOGRAFÍA DE LA UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

Jefe de Proyecto

Dr. Alfonso Fernández R.

Profesionales asociados

Ingeniero Geomático Sr. Andreaw Rifo P.

Geógrafo Sr. Gianni Leal P.

Citar este informe como sigue:

Dirección General de Aguas (DGA), 2022. **MONITOREO DE DETALLE INTENSIVO DEL GLACIAR PRINCIPAL DEL COMPLEJO VOLCÁNICO NEVADOS DE CHILLÁN, REGIÓN DE ÑUBLE, MACROZONA SUR, 2021-2022**, SIT N°529, 2022. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Unidad de Glaciología y Nieves. Realizado por: DEPARTAMENTO DE GEOGRAFÍA DE LA UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN.

Índice de contenidos

1. RESUMEN	6
2. INTRODUCCIÓN	7
3. ANTECEDENTES.....	7
4. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	10
5. OBJETIVOS	12
GENERAL	12
ESPECÍFICOS.....	12
6. METODOLOGÍA.....	13
A. MONITOREO CON BALIZAS Y BALANCE GLACIOLÓGICO.....	13
B. MEDICIONES CON LIDAR Y BALANCE GEODÉSICO	16
C. VARIACIONES AREALES DEL GLACIAR	17
7. RESULTADOS	18
A. MONITOREO CON BALIZAS Y BALANCE GLACIOLÓGICO.....	18
B. MEDICIONES CON LIDAR Y BALANCE GEODÉSICO	23
C. VARIACIONES AREALES DEL GLACIAR	27
8. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	29
9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	31
10. ANEXOS	35

Índice de figuras

Figura 1: Glaciar CL108116004 del sector norte del complejo volcánico Nevados de Chillán	11
Figura 2: Mapa del área de estudio con la localización de balizas instaladas en octubre 2021.....	14
Figura 3: Registros fotográficos del procedimiento empleado por el equipo de trabajo para la instalación de balizas de ablación	15
Figura 4: Registros fotográficos del levantamiento LiDAR durante la primera campaña período 2021-2022	17
Figura 5: Fotografías que muestran ejemplos de balizas tumbadas en su posición, encontradas durante la campaña de enero 2021.....	19
Figura 6: Mapa indicando ángulo y magnitud del desplazamiento de balizas durante el período de estudio.....	23
Figura 7: Mapas del balance geodésico de los períodos invierno (octubre-abril 2021), verano (abril 2022 – octubre 2021) y anual (abril 2022 – abril 2021).....	24
Figura 8: Distribución altitudinal del cambio de espesor según la sustracción de datos LiDAR	25
Figura 9: Cambio superficial 2021-2022, considerando área interpretada como cubierta por detritos.....	28
Figura 10: Elevación de la isoterma de cero grados.....	30

Índice de tablas

Tabla 1: Distribución de área englacada por macrozonas glaciológicas de acuerdo con superficie de polígonos disponible en el Inventario Público de Glaciares	8
Tabla 2: Balizas instaladas sobre el glaciar.....	19
Tabla 3: Balance glaciológico por baliza, período octubre 2021 a abril 2022	20
Tabla 4: Desplazamientos GNSS balizas de ablación.....	21
Tabla 5: Resumen del balance geodésico 2021-2022.....	26
Tabla 6: Diferencias entre datos GNSS (cinemáticos) y levantamiento LiDAR.....	27
Tabla 7: Variaciones de superficie y frente analizadas en este estudio. Valores anteriores al año 2021 provienen de DGA (2022)	27

1. Resumen

Concentrando más del 80% de la superficie de hielo en Sudamérica, los glaciares de Chile, especialmente aquellos localizados en la zona centro-norte, central y centro-sur, cumplen un rol fundamental en la mantención de caudales. Los glaciares de la región de Ñuble se localizan en la sección norte de la macrozona glaciológica Sur, la cual concentra aproximadamente el 5% del área total de hielo del país. Dentro de esa zona, los Nevados de Chillán representan uno de los pocos lugares donde existe registro cuantitativo de fluctuaciones de la superficie de glaciares. Por lo tanto, se constituye como un sitio ideal para implementar sistemas de monitoreo continuo. En el presente documento se describen los resultados del monitoreo de detalle intensivo del Glaciar Noroeste del Complejo Volcánico Nevados de Chillán (CL108116004). El estudio se realizó combinando análisis de imágenes satelitales, vuelos drone, levantamientos GNSS, balance geodésico usando LiDAR, y balance glaciológico empleando balizas de ablación. Se determinó que el glaciar no ha perdido superficie de forma significativa entre 2021 y 2022, ya que el análisis del vuelo drone sugirió que existe una zona frontal de hielo recubierto más grande de lo que indican estudios previos, y que resulta difícil de identificar con imágenes de menor resolución, como ASTER, LANDSAT, o Sentinel. El balance glaciológico midiendo emergencia de balizas sugiere pérdidas que van hasta casi los -8 m.eq.a, con cambios en alturas GNSS superiores -12 m en un caso. La pérdida entre enero y abril 2022 tiene magnitudes similares a aquellos de enero a abril 2021 y son comparables a previos resultados obtenidos en glaciares cercanos. Sin embargo, esta es la primera vez que en esta zona se pudo medir el balance de octubre-enero mediante GNSS tomados en la posición de las balizas, donde se pudo determinar que gran parte de la pérdida de masa anual ocurrió en ese período. El análisis del balance geodésico, por su parte, indicó un adelgazamiento promedio de $-5,37 \pm 1,99$ m, una pérdida máxima de -16,36 m y una ganancia máxima de 2,95m. Los datos también indicaron una alta variabilidad estacional, con acumulación ocurriendo a lo largo de toda el área del glaciar entre abril y octubre 2021, mientras que ablación a toda altitud entre octubre 2021 y abril 2022.

2. Introducción

Concentrando más del 80% de la superficie de hielo en Sudamérica (Segovia y Videla 2017), los glaciares de Chile, especialmente aquellos localizados en la zona centro-norte, central y centro sur, cumplen un rol fundamental en la mantención de caudales base durante el verano, siendo incluso más importantes durante períodos de sequía (Casassa et al, 2009; Gascoin et al, 2011; Ohlanders et al, 2013). Asimismo, las relativamente simples relaciones entre el balance energético superficial y la temperatura del aire, así como entre la acumulación de nieve y la precipitación, hacen de los glaciares indicadores sensibles de cambios climáticos (Fernández y Mark 2016; Mark y Fernández 2017) y por lo tanto su monitoreo contribuye a conocer las consecuencias del calentamiento global (Bojinski et al., 2014; Thornton et al., 2021). En el caso chileno, esto ha sido demostrado en la creciente cantidad de estudios que indican pérdida de masa de hielo en un escenario de calentamiento atmosférico generalizado (Braun et al, 2019; Dussailant et al, 2019; Masiokas et al, 2020).

Diseñar e implementar políticas públicas para enfrentar los efectos del cambio climático requieren programas de seguimiento de indicadores hidrometeorológicos (Valdés-Pineda et al, 2014). En el caso de las zonas de montaña, el monitoreo de cambios en glaciares constituye una herramienta con más de un siglo de desarrollo, permitiendo la cuantificación y evaluación de los impactos de fluctuaciones climáticas y sus consecuencias en la disponibilidad de agua (Haeberli et al, 2007). De hecho, cambios de superficie y balance de masa corresponden a una de las variables consideradas esenciales para el estudio del clima (Bojinski et al, 2014).

Los glaciares de la región de Ñuble se localizan en la sección norte de la macrozona glaciológica Sur, la cual concentra aproximadamente el 5% del área total de hielo del país (Segovia y Videla, 2017). Dentro de esa zona, los Nevados de Chillán representan uno de los pocos lugares donde existe registro cuantitativo de fluctuaciones de la superficie de glaciares (Caro, 2017; CECs, 2011; DGA, 2022; De Moraes et al., 2020; Reinthaler et al., 2019; Rivera and Bown, 2013; Zenteno et al., 2004). Por lo tanto, se constituye como un sitio ideal para implementar sistemas de monitoreo continuo. El presente documento describe los resultados del monitoreo de detalle intensivo del Departamento de Geografía, Universidad de Concepción, para el monitoreo del Glaciar Noroeste del Complejo Volcánico Nevados de Chillán (CL108116004), Región de Ñuble, encargado a este Departamento a contar del 31 de mayo del 2021, de acuerdo con la resolución exenta DGA 1190. Este informe corresponde al informe final de este trato directo que apoya la misión de la Unidad de Glaciología y Nieves (UGN), Dirección General de Aguas (DGA), Ministerio de Obras Públicas (MOP).

3. Antecedentes

En términos generales, un glaciar se puede identificar como cuerpos de hielo que se originan por acumulación de nevadas y se pueden clasificar como: glaciares de montaña y campos de hielo, pequeños casquetes de hielo, capas de hielo continental y

plataformas flotantes de hielo (Cuffey y Paterson, 2010). El término “glaciar” puede ser definido, según Lliboutry (1956) como *“toda masa de hielo, formada por acumulación de nieve, de cualquier dimensión y forma, que fluye por su propio peso hacia alturas inferiores”*. Otra definición es propuesta por el Glosario de Balance de Masa Glacial y de Términos Relacionados, donde señala a un glaciar como *“masa perenne de hielo, y posiblemente de neviza y nieve, originada en la superficie por recrystalización de nieve u otras formas de precipitación sólida, con evidencia de flujo en el pasado o en el presente”* (Cogley et al, 2011). Por otro lado, la definición operativa práctica y fácil de aplicar que se utilizó en la Estrategia Nacional de Glaciares define glaciar como: *“Toda superficie de hielo y nieve permanente generada sobre suelo, que sea visible por períodos de al menos 2 años y de un área igual o superior a 0,01 km² (una hectárea); o cualquier superficie rocosa con evidencia superficial de flujo viscoso, producto de un alto contenido de hielo actual o pasado en el subsuelo”* (CECs, 2009).

De acuerdo a la Estrategia Nacional de Glaciares Chile posee cuatro macrozonas glaciológicas, en que cada una representa condiciones glaciológicas, climáticas, e hidrológicas, relativamente homogéneas (CECs, 2009). Definida usando como base las cuencas hidrográficas, estas macrozonas glaciológicas dividen al país en una zona Norte que va desde el límite con Perú (~18°S) hasta la cuenca del río Choapa (~32°S), una Central que termina por el sur en la cuenca del río Maule (~36°S), una zona Sur que se extiende hasta la cuenca del río Aysén (~45°30'), y finalmente, una Austral que comprende el resto de Chile Continental (~56°S). Un análisis de la última versión disponible del Inventario Nacional de Glaciares de la Dirección General de Aguas¹, indica que la macrozona glaciológica Sur es la segunda en cobertura de hielo, doblando las macrozonas Central y Norte (Tabla 1).

Tabla 1: Distribución de área englacada por macrozonas glaciológicas de acuerdo con superficie de polígonos disponible en el Inventario Público de Glaciares¹.

Zona glaciológica	Superficie glacial (km ²)	Superficie glacial (%) *
Norte	233,8	1,11
Centro	910,66	4,33
Sur	1,180,29	5,61
Austral	18,685,06	88,93

* relativa al total área glacial del país

Las macrozonas glaciológicas incluyen glaciares con distintas formas, tamaños y orientaciones. Sin, embargo, existen ciertas características comunes que les dan su particularidad (Figura 1). En el norte, glaciares pequeños son la norma, y se localizan en una zona climática árida donde las dinámicas de acumulación tienden a estar

¹ <https://dga.mop.gob.cl/estudiospublicaciones/mapoteca/Documents/IPG2022.zip>, descargado el 21/07/2022.

correlacionadas directamente con fenómenos que ocurren en la cuenca del Amazonas. Por su parte, la zona central posee una mayor cantidad de glaciares relativamente grandes ($>5 \text{ km}^2$, ej. Bown et al, 2008) gracias a un aumento de la precipitación nival, una más marcada estacionalidad de la temperatura del aire, combinada con importantes alturas Andinas. La zona sur contiene glaciares más pequeños debido al descenso de los Andes, a pesar de importantes aumentos en la acumulación nival. En la zona austral, por su parte, abundan glaciares inmensos, en muchos casos con frentes desprendentes. Debido a la cantidad de población del país que habita los valles centrales y la costa adyacentes a las macrozonas glaciológicas Norte y Centro, cambios hidroclimáticos en las zonas de montaña que albergan glaciares pueden potencialmente impactar el uso del agua corriente abajo.

Así, el monitoreo de distintos tipos de glaciares en las diferentes macrozonas glaciológicas resulta fundamental para determinar la sensibilidad de toda la criósfera chilena frente a cambios hidroclimáticos de diversas escalas espaciotemporales, e intervenciones humanas directas.

El Lineamiento Estratégico 1 de la Estrategia Nacional de Glaciares le atribuye a la DGA la misión de *"Generar y difundir información glaciológica, con robustas bases científicas, permitiendo la toma de decisiones de manera informada en aspectos que involucren glaciares y sus recursos hídricos asociados, en el presente y futuro"* (CECs, 2009). Para cumplir con esa tarea, se han definido las siguientes líneas de acción:

- Línea de Acción 1: Definir una línea de base glaciológica, que establezca el estado pasado, actual y futuro de los glaciares de Chile.
- Línea de Acción 2: Organizar y difundir los estudios y la información glaciológica de manera de coordinar a los científicos y mantener informados a los tomadores de decisión y a la comunidad en general.

Para la consecución de la Línea de Acción 1 se considera el desarrollo e implementación de metodologías basadas en un sistema jerárquico de observación que contempla 5 niveles de detalle, donde el nivel 2 corresponde a un monitoreo intensivo que incluye los siguientes procedimientos:

- Balance de masa glaciológico: Mediciones de acumulación y ablación para determinar el balance de masa anual de glaciares, utilizando el método glaciológico. Considera instalación de (a) red de balizas de ablación, (b) pozos estratigráficos de acumulación, (c) muestreo de densidad del manto nival, y (d) extrapolación de resultados discretos de balances de masa a toda el área glaciar mediante técnicas digitales y empleo de softwares geográficos.
- Balance de masa geodésico: Corresponde a un grupo de métodos para determinar el balance por medio de la determinación de la altimetría espacialmente distribuida. Este método incluye la sustracción entre elevaciones

de cartografía, modelos digitales de elevación, nubes de puntos LiDAR, entre otros.

- Balance de energía: Medición de los flujos de energía y fusión glaciar en diferentes tipos de superficie de glaciares (nieve, hielo y hielo cubierto). Incluye (a) evaluación de métodos simplificados de correlación entre condiciones meteorológicas y balance de masa, (b) instalación de Estaciones Meteorológicas Automáticas para la medición de diversos parámetros meteorológicos, y (c) la simulación de fusión y flujos energéticos mediante uso de modelos empíricos simples y complejos con bajos requerimientos de datos de entrada.
- Balance hidrológico: Mediante el monitoreo de caudales a la salida de glaciares. Comprende sistemas de aforo y modelación hidrológica de caudales, calibrando parámetros glaciológicos, glacio-dinámicos e hídricos.
- Cinemática glaciar: Determinación de velocidades de flujo de hielo.
- Delimitación de zonas de riesgo: Identificación de cuencas expuestas a riesgos de origen glaciar, generando mapas de riesgo para las zonas más vulnerables.
- Testigos superficiales de nieve: Extraídos para análisis biológicos y físicos en las zonas de acumulación, practicándose en ellos estudios estructurales y de trazadores biológicos, para determinar acumulación y ablación en años previos y entender la estructura estratigráfica del glaciar.

En este contexto, los términos de referencia para la prestación de servicios personales especializados, cuyo **objetivo general** es “**apoyar con el monitoreo de detalle intensivo (nivel 2) del glaciar principal del complejo volcánico Nevados de Chillán, código Banco Nacional de Aguas (BNA) CL108116004, cuenca del río Itata, región de Ñuble, ubicado en el extremo norte de la Macrozona Sur**” indican que la DGA solicita desarrollar un estudio como parte del nivel 2 especificado en la Estrategia Nacional de Glaciares, con la finalidad de apoyar y complementar el trabajo del equipo de especialistas de la UGN. En particular, este apoyo consiste en el análisis de los cambios areales del glaciar, el desarrollo de un balance glaciológico de la zona de ablación, uno geodésico, y el apoyo logístico para el levantamiento de información en terreno. De esta forma, el servicio especializado responde fundamentalmente a la ejecución de procedimientos de detalle nivel 2 para medir balance de masa. En lo siguiente, se describe la metodología usada para lograr los objetivos del servicio a prestar.

4. Descripción del área de estudio

El área de estudio para la realización del monitoreo corresponde al glaciar CL108116004, según código asignado por el Inventario Público de Glaciares 2022v1, que es el principal cuerpo de hielo que cubre el complejo volcánico Nevados de Chillán. El glaciar se

encuentra ubicado en la comuna de Pinto, en la cabecera de la cuenca del río Itata y corresponde a un glaciar de montaña. Según datos del Inventario Público de Glaciares, elaborado al año 2019 (año de la imagen satelital utilizada en la elaboración del inventario publicado en 2022), poseía una superficie de 0,684 km² (aunque corregida a 0,54 km² en el reporte de DGA 2022), la cual, para el año 2021 se había reducido a 0,42 km² (DGA, 2022). El volcán Nevado de Chillán, sobre el cual se emplaza el glaciar de esta investigación, posee una altitud de 3.212 m y forma parte de un complejo volcánico conformado por más de 15 centros de emisión (SERNAGEOMIN, 2018). Registros hidroclimáticos recientes indican que la región está sufriendo un acelerado aumento de las temperaturas y una marcada disminución de las precipitaciones (ej. Schumacher et al, 2020), situación que ha sido definida como una “megasequía” (Garreaud et al, 2020). Hidrológicamente, la región glaciológica donde se localiza este cuerpo de hielo ha sido clasificada como una de las áreas de montaña más vulnerables del planeta (Immerzeel et al, 2020).

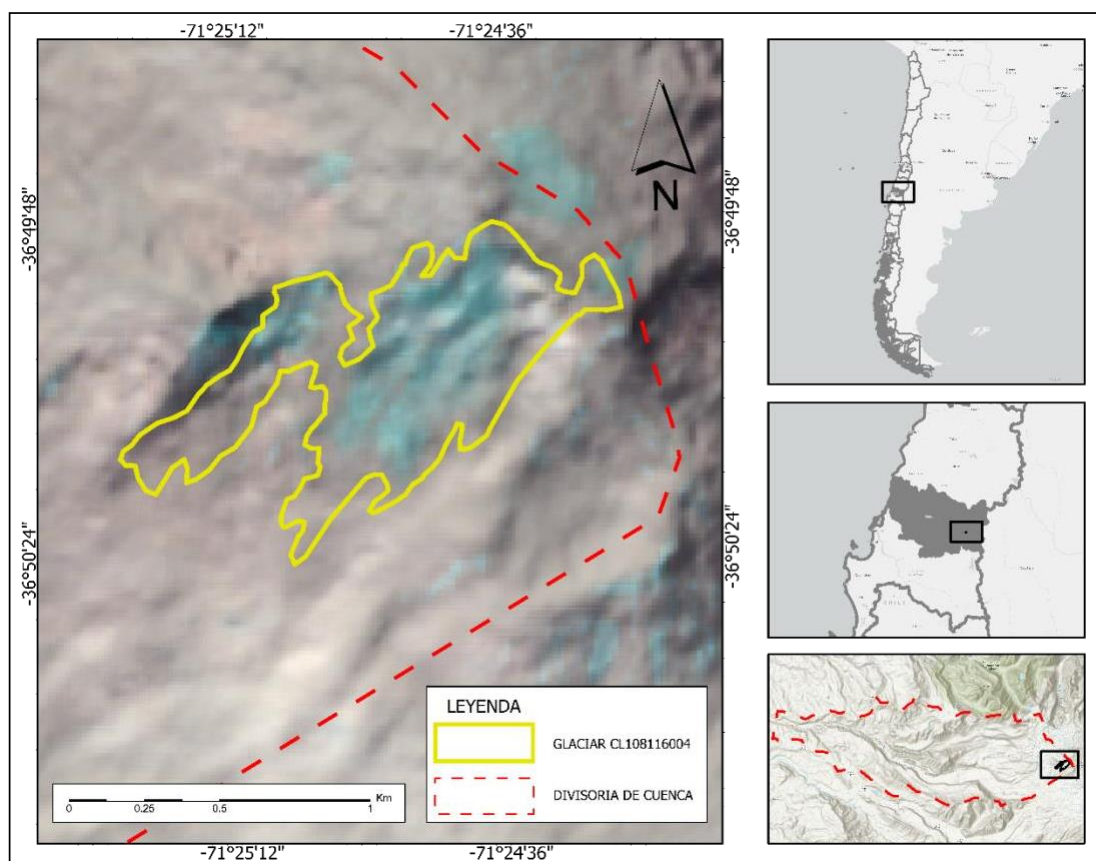


Figura 1: Glaciar CL108116004 del sector norte del complejo volcánico Nevados de Chillán (Fuente de márgenes glaciares: Inventario Público de Glaciares año 2022²; fuente imagen: Sentinel 2A_SR, COPERNICUS, 18/04/2022, descargada desde Google Earth Engine).

² <https://dga.mop.gob.cl/estudiospublicaciones/mapoteca/Documents/IPG2022.zip>, descargado el 21/07/2022.

5. Objetivos

General

Apoyar con el monitoreo de detalle intensivo (nivel 2) del glaciar noroeste del complejo volcánico Nevados de Chillán, código Banco Nacional de Aguas (BNA) CL108116004, cuenca del río Itata, región de Ñuble, ubicado en el extremo norte de la Macrozona Sur.

Específicos

- Proponer sobre el glaciar un mínimo de 5 y un máximo de 10 sitios para ubicar balizas durante el periodo estival para medir ablación.
- Realizar una primera campaña al glaciar principal del complejo volcánico Nevados de Chillán en septiembre u octubre de 2021, instalando en total 5 a 10 balizas de al menos 5 metros de profundidad, una en cada sitio propuesto, sitios que deben ser previamente aprobados por el Inspector Fiscal, midiendo sus coordenadas con receptor GNSS doble frecuencia en modo diferencial, y registrando la altura de cada baliza.
- Medir durante el mes de enero o febrero de 2022, y luego nuevamente en marzo o abril de 2022, en total dos ocasiones, las coordenadas de cada una de las balizas mencionadas con receptor GNSS doble frecuencia en modo diferencial, y registrando la altura de cada baliza.
- Apoyar logísticamente un levantamiento del glaciar CL108116004 con LiDAR terrestre que será realizado por un especialista de la UGN mediante un instrumento de la UGN, en marzo o abril 2022, al final del verano.
- Confeccionar un balance de masa geodésico del glaciar CL108116004, tanto invernal (invierno 2021) como estival (verano 2021-2022), en base a levantamientos LiDAR terrestres del fin de verano 2020-21, fin de invierno 2021 y fin verano 2021-2022, cuyos datos serán proporcionados por la UGN. El tamaño espacial de la grilla deberá ser de 5 metros, modificable previa autorización del Inspector Fiscal.
- Confeccionar un balance de masa glaciológico superficial estival de la zona de ablación del glaciar CL108116004, donde se instalaron las balizas, y comparar dicho balance de masa glaciológico con superficial con el balance de masa geodésico correspondiente al mismo sector y período.

- Determinar la variación areal del glaciar CL108116004, respecto al fin del verano 2020-2021, en base a una imagen satelital del fin del verano 2022 (marzo-abril 2022), de al menos 15 metros de resolución espacial, que podrá ser complementado con los datos LiDAR terrestre mencionados, levantamiento GNSS diferencial, fotografías aéreas y/o levantamiento fotogramétrico realizado mediante dron, o bien otro método que denegará autorizar el Inspector Fiscal.
- Entregar un Informe Final con el detalle de todos los antecedentes, las tareas, metodologías, cálculos y resultados finales, con anexos digitales de todos los datos brutos y procesados, incluyendo imagen(es) satelital(es), y al menos 12 (doce) fotos de las campañas de terreno. El Informe Final entregable deberá ajustarse a la línea editorial DGA, según se especifica en el documento "LÍNEA EDITORIAL DGA: PROCEDIMIENTOS PARA LA EDICIÓN DE PUBLICACIONES DE LA DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS, SDT N° 18, Versión 2019, disponible en <http://documentos.dga.cl/OTR5831.pdf>.

6. Metodología

La siguiente sección se organiza de acuerdo con los objetivos específicos indicados en los términos de referencia para la prestación de servicios personales especializados. De esta forma, los métodos propuestos responden a varios objetivos a la vez, los cuales se enuncian al inicio de cada apartado.

A. Monitoreo con balizas y balance glaciológico

Para la determinación de ubicación de balizas se consideró establecer una red longitudinal que maximizara la cobertura, es decir siguiendo el método de la estaca-índice (Ostrem y Brugman, 1991) complementada con algunas balizas transversales (Figura 4). Una vez definidas las localizaciones, en acuerdo con el Inspector Fiscal, un taladro para hielo marca Kovacs se utilizó para perforar desde la superficie. Para las balizas, se emplearon tubos de PVC de 1 a 1,5 m, unidos mediante coplas o cordines (Permana et al, 2019).

Tal como es solicitado en la resolución 1190, se realizaron 3 campañas de terreno. Durante la primera, el 23 de octubre de 2021, se realizó un primer levantamiento LiDAR, instalándose el primer set de 7 balizas de ablación. La segunda campaña fue ejecutada el 15 de enero de 2022, durante la cual se visitaron los sitios de instalación de balizas y se realizaron mediciones con GNSS diferencial de doble frecuencia. La última campaña se desarrolló el 6 de abril de 2022, vía apoyo de helicóptero, obteniéndose la última medición de balizas y mediciones LiDAR.

Para la medición de balizas sobre el glaciar, se registró la altura entre la superficie del hielo y el extremo más alto de la estaca al milímetro más cercano, utilizando cintas

métricas. Sin embargo, antes de instalar cada estaca, la localización y altitud de la perforación fueron medidas con GNSS diferencial, de la forma que se describe en los siguientes párrafos.

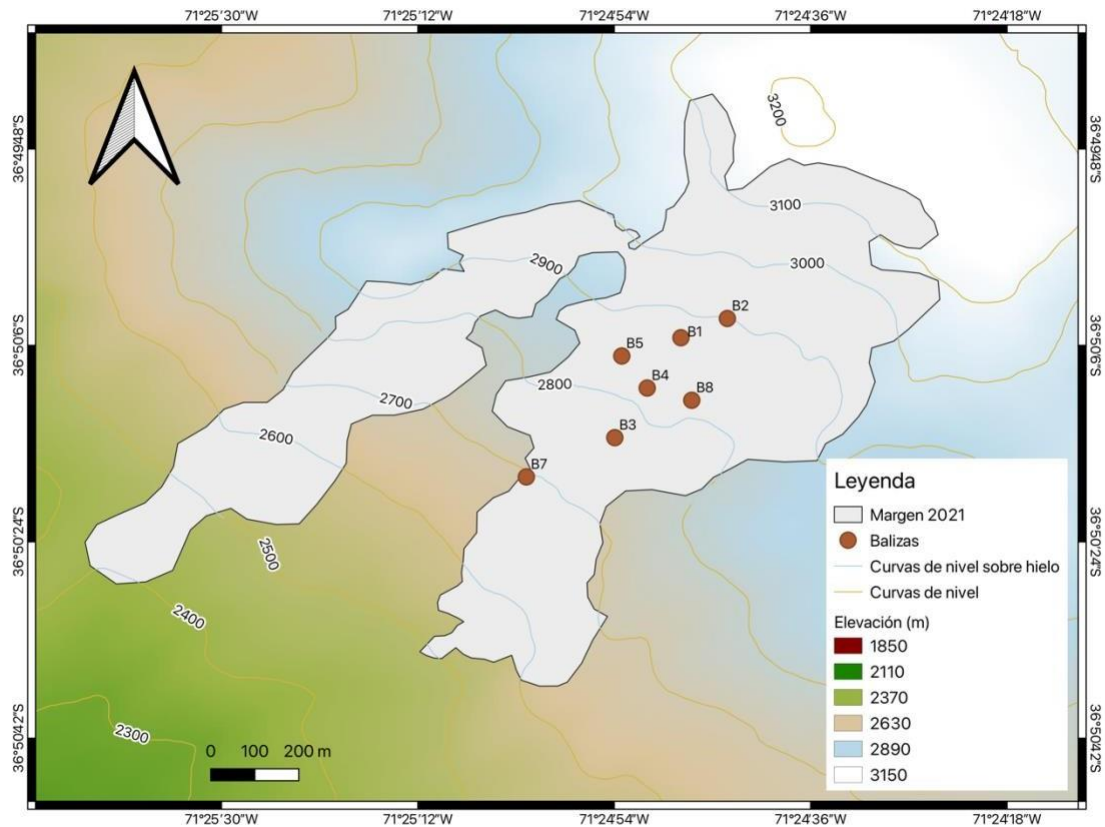


Figura 2: Mapa del área de estudio con la localización de balizas instaladas en octubre 2021. El margen del glaciar corresponde a aquel del año 2021.

En primer lugar, se definió un punto geodésico base, que corresponde a uno ya existente de campañas previas (DGA, 2022). Este punto, cercano al glaciar, entrega referencia a los puntos a tomar dentro del cuerpo de hielo. Sobre este punto "Base", con coordenadas ya conocidas, se instala un equipo GNSS doble frecuencia que sirve como la "Estación Base" cada vez que se realicen mediciones GNSS sobre el glaciar, de tal manera que estas últimas reciben una corrección diferencial asociadas a la posición de la estación base mediante post-procesamiento.

La marca del punto "Base" está marcada mediante la instalación de un perno de anclaje sobre una roca con ubicación segura y estable cercana al frente del glaciar (roca de grandes dimensiones, lejos de laderas activas, no susceptible a movimientos locales, etc.). Para esto, se realizó una perforación en la superficie de la roca, se empotró un perno y, para extremar precauciones, se aplicó también un adhesivo de curado rápido para asegurar la correcta fijación.



Figura 3: Registros fotográficos del procedimiento empleado por el equipo de trabajo para la instalación de balizas de ablación (PVC) en el glaciar CL108116004 durante la primera campaña período 2021-2022 (Fuente: Propia).

Durante el levantamiento de puntos, la estación “Base” estuvo registrando su posición en modo estático, mientras que el o los Rover trabajaron en modo “PPK”, “Stop&Go” o “Estático rápido” sobre el glaciar. Luego de coleccionar los puntos de interés, sean estas balizas, posiciones de puntos de control para el levantamiento LiDAR (ver más adelante), puntos de apoyo u otros, se debió realizar el cálculo de dichas coordenadas mediante postproceso, el cual se efectuó utilizando el software *Trimble Business Center* (TBC). De esta manera, se aplicó la corrección diferencial a los puntos levantados en referencia a las coordenadas ya conocidas de la estación Base.

Para el caso específico de medición GNSS de las balizas de ablación, se midió la posición al costado de la perforación (<5cm de distancia), aplicando el método “estático rápido” por aproximadamente 20 minutos. Se utilizó un bípode para asegurar la no adición de errores involuntarios y con ello cumplir con la precisión exigida en el proyecto. Luego, se registraron las posibles secciones expuestas (o altura) de las correspondientes balizas.

Finalmente, para el cálculo del balance de masa en metros equivalente en agua, se utilizaron 3 valores de densidad para reportar los resultados, uno para nieve (510 kg/m³, DGA-UCHILE, 2012), otro para hielo (850 kg/m³, Huss, 2013) y un promedio entre ambos (610 kg/m³). Esto se debe a que, si se utiliza la fórmula de cálculo propuesta por Carrasco et al (2008) y empleada por una serie de trabajos posteriores (ej. Barria et al, 2019), el glaciar se encuentra situado en una zona donde la isoterma de cero grados tiene a ubicarse a unos pocos metros de la cumbre, que sugiere cambios extremos de condiciones meteorológicas que determinan el balance de masa, pasando de condiciones de acumulación completa durante el invierno, a ablación a lo largo de todo el cuerpo de hielo durante el verano.

B. Mediciones con LiDAR y balance geodésico

Tres set de datos LiDAR fueron medidos por personal de la DGA, uno de abril 2021 y otros dos realizados durante las campañas del 26 de octubre 2021 y 6 de abril 2022, los que posteriormente fueron georreferenciados utilizando puntos de control proporcionados por el equipo de trabajo de la Universidad de Concepción. Estos puntos de control correspondieron a trozos de cintas reflectantes que se adosaron a balizas y rocas visibles desde la posición de medición del LiDAR (Figura 4). Los datos levantados mediante escáner laser terrestre fueron proporcionados en formato *.las" a una resolución espacial de 0,5m. Estas nubes de puntos fueron interpoladas aplicando IDW en su resolución espacial original y luego agregadas a 5m; esto utilizando el conjunto de herramientas LiDAR y ráster de Whitebox en QGIS versión 3,22. Los datos LiDAR se compararon en el área máxima de traslape de los levantamientos. Según reporte de personal DGA, las nubes de puntos de octubre 2021 y abril 2022 fueron ajustadas con reflectores y la nube de puntos utilizada para el levantamiento LiDAR de abril 2021, reportado en un informe técnico previo (DGA, 2022). De acuerdo a la información de coregistro proporcionada por personal DGA que realizó la georreferenciación de los datos LiDAR, las incertidumbres horizontales se estiman inferiores a 20 cm, es decir más de un orden de magnitud menor que la resolución espacial usada para comparación. Por su parte, la incertidumbre vertical se determinó calculando el error medio cuadrático (RMSE por sus siglas en inglés) de las diferencias entre cada período de análisis, comparando 50 puntos localizados en zonas estables, fuera del área de glaciación, lo que arrojó un valor de ± 2 cm. La fórmula empleada fue:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (L1_i - L2_i)^2}{n}}$$

En esta ecuación, n representa el número total de puntos comparados (50), L1 y L2 indican los respectivos pares de MDT LiDAR desde donde se extrajo cada punto. Para la comparación abril 2021 y 2022, el resultado indicó $\pm 0,18$ m, mientras que este fue $\pm 0,19$ m para abril vs octubre 2021, y $\pm 0,16$ m entre octubre 2021 y abril 2022.



Figura 4: Registros fotográficos del levantamiento LiDAR durante la primera campaña período 2021-2022, con el círculo rojo mostrando un reflector emplazado en una roca sobre el glaciar (Fuente: Propia).

C. Variaciones areales del glaciar

Para la determinación del margen del glaciar en 2022 se utilizaron dos fuentes: una imagen Sentinel 2A (resolución de 10 m de píxel) y un vuelo drone. La imagen satelital, de fecha 8 de abril de 2022, fue utilizada para identificar el borde del glaciar mediante la aplicación de interpretación visual. El criterio de selección de la imagen Sentinel fue buscar escenas con nubosidad menor al 10% para la fecha más cercana al 6 de abril de 2022, correspondiente a aquella de la campaña de terreno. Las imágenes que cumplieron ese criterio las del 3 y 8 de abril, utilizándose esta última. Se utilizó la combinación de bandas B11 (Thermal Infrared 2), B5 (Near Infrared) en conjunto con el uso del índice de nieve normalizado (NDSI por la sigla en inglés) usando las bandas B11, B5 y B4, delimitando el contorno del glaciar mediante digitalización en pantalla. La realización de varias interpretaciones indicó consistencia en la determinación del margen, con diferencias inferiores al 5%, mayormente asociadas a la delimitación del hielo recubierto y la zona de conexión entre los fragmentos del glaciar. Por eso, con el fin de refinar la interpretación inicial del borde del glaciar, durante la campaña de abril 2022, se realizó un vuelo sobre la sección baja, empleando un equipo DJI Mavic Pro 2 a una altura de vuelo de 100 m sobre el punto de despegue, lo que da una resolución espacial nominal de 2,38 cm asumiendo superficie plana. El procesamiento fotogramétrico se realizó en el software UASMaster de Trimble, generando un mosaico a una resolución espacial de 0,18 m, el cual se interpretó visualmente por miembros del equipo de trabajo. El mosaico a esta resolución permite discriminar detalles del terreno que son imposibles de observar por la imagen Sentinel. Sin embargo, dada la disponibilidad de tiempo durante la campaña de terreno, no se pudo medir puntos de control GNSS para georreferenciar el vuelo de forma precisa. Por esta razón, se asume que la incertidumbre horizontal del vector interpretado desde el mosaico es consistente con aquellas esperables para análisis con imágenes satelitales, donde experimentos usando puntos de chequeo muestran incertidumbres horizontales distribuidas de acuerdo a una curva gaussiana, de entre 1

(x) a 4 (y) metros empleando alturas de vuelo de 35 metros (Kalacska et al., 2020). Considerando que la altura de vuelo de esta ocasión es casi 3 veces lo indicado en esos experimentos (Kalacska et al., 2020), el error se asume en el orden de ± 12 m al 95% intervalo de confianza de una distribución gaussiana (2 desviaciones estándar), equivalente al reportado para las imágenes Sentinel que emplean puntos de control para la geolocalización³, $\pm 12,5$ m (95% intervalo de confianza de una distribución gaussiana o 2 desviaciones estándar). Usando estos valores para resolver ecuaciones establecidas para la determinación de incertidumbre que consideran la resolución espacial y errores nominales de geolocalización (ej. Ye et al, 2006), la incertidumbre de las diferencias entre áreas glaciares 2021 y 2022 corresponde a $0,0009 \text{ km}^2$, para la comparación entre escenas Sentinel, y $0,0005 \text{ km}^2$, para las zonas coincidentes entre imágenes Sentinel y vuelo dron. El vector derivado del mosaico fue concatenado con las secciones interpretadas desde la imagen satelital, para así obtener el margen 2022.

7. Resultados

A. Monitoreo con balizas y balance glaciológico

En la campaña de octubre 2021, se instalaron 7 balizas en el glaciar. Originalmente, se planeó instalar todas las balizas a una profundidad superior a 5 metros, lo cual solo se pudo lograr con las balizas B4, B7 y B8. Para el resto, las condiciones de dureza del hielo no permitieron seguir perforando con el taladro Kovacs, solo pudiendo obtener profundidades de entre 3 a 4 metros. Las alturas de emergencia de todas las balizas fluctuaron entre 0,75 a 0,894 m. Durante la visita a terreno de enero 2022, se logró identificar la posición de 5 de las 7 balizas, aunque en todos esos casos ellas se encontraron tumbadas en el suelo, junto a tenues marcas de las perforaciones realizadas en octubre. Esta situación solo permite inferir una ablación mínima de -4,7 m. La medición GNSS de las posiciones de balizas que se pudieron identificar en terreno sugiere ablación de entre 2 a 4 veces la longitud original de instalación. En aquellos lugares donde se encontraron balizas, estas fueron reinstaladas con longitudes totales de 6 metros en algunos casos (Figura 5). Sin embargo, en esa campaña se encontró una baliza tumbada, correspondiente a una de las que se instalaron en enero 2021, lugar donde se instaló una nueva, etiquetada como B2A. En abril 2022, la medición de altura sobre el hielo fue posible en solo 4 de las balizas instaladas en octubre, mostrando pérdidas cercanas a los -3,5 m (Tabla 2). Las diferencias entre el cambio de espesor determinado con balizas y aquel estimado con mediciones GNSS está determinado por el hecho de la pérdida completa de balizas en enero 2022, lo que para estas últimas solo permite reportar un valor de adelgazamiento mínimo para el balance estival, que en todos los casos es menor que la diferencia determinada en base a GNSS. Por otro lado, la diferencia en adelgazamiento para las balizas encontradas en abril 2022 indica diferencias inferiores a 25 cm.

³ <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2-msi/performance>, revisado el 22 de septiembre de 2022



Figura 5: Fotografías que muestran ejemplos de balizas tumbadas en su posición, encontradas durante la campaña de enero 2021 (izquierda), y la reinstalación de balizas durante los mismos trabajos (derecha). Fuente: propia.

Tal como fue indicado arriba, durante el primer período la medición GNSS de las posiciones de balizas que se pudieron identificar en terreno sugiere ablación de entre 2 a 4 veces la longitud original de instalación. La medición de abril, por su parte, entrega valores muy similares a los determinados para la emergencia de balizas. Este resultado sugiere que gran parte de la pérdida de masa del período 2021-2022 ocurrió antes de enero 2022, con valores que en general superan las expectativas de ablación. Esto es particularmente importante de destacar para la B7, la cual desapareció completamente, a pesar de que fue instalada sobre una zona de hielo recubierto que se observó con un espesor superior a 20 cm. Además, en los puntos donde se pudo realizar mediciones GNSS en todo el período anual, se detecta pérdidas mayores a -10 m, a excepción de B3 (Tabla 2).

Tabla 2: Balizas instaladas sobre el glaciar. La posición y elevación de las balizas de ablación entre octubre 2021 y abril 2022 se presentan en sistema UTM H19S, WGS84, época:2021,0. También se presentan las alturas de emergencia de cada baliza en metros

Baliza	Fecha	Coord. UTM Este (m)	Coord. UTM Norte (m)	Altura GNSS posición baliza (m)	Diferencia altura GNSS posición baliza (m)	Largo total baliza instalada (m)	Largo sección saliente baliza (m)
B1	24-10-2021	284792,874	5920735,824	2850,216	-	4,00	0,794
	15-01-2022	284790,267	5920728,660	2842,174	-8,042	5,00	0,533
	06-04-2022	284789,046	5920727,101	2838,873	-3,301	-	3,71
	Total período	-	-	-	-11,343	-	-
B2	24-10-2021	284896,339	5920792,933	2884,162	-	4,00	0,800

Baliza	Fecha	Coord. UTM Este (m)	Coord. UTM Norte (m)	Altura GNSS posición baliza (m)	Diferencia altura GNSS posición baliza (m)	Largo total baliza instalada (m)	Largo sección saliente baliza (m)
	15-01-2022	284893,599	5920779,281	2871,579	-12,583	3,00	0,875
	06-04-2022	*	*	*	*	-	*
B3	24-10-2021	284649,607	5920449,732	2747,154	-	4,00	0,795
	15-01-2022	284648,913	5920448,513	2740,959	-6,195	4,00	0,363
	06-04-2022	284647,927	5920447,535	2738,489	-2,47	-	-
	Total período	-	-	-	-8,665		-
B4	24-10-2021	284719,189	5920591,657	2795,899	-	5,00	0,829
	15-01-2022	284713,489	5920587,558	2787,383	-8,516	6,00	0,722
	06-04-2022	284713,106	5920586,382	2783,508	-3,875	-	4,34
	Total período	-	-	-	-12,391		-
B5	24-10-2021	284659,988	5920680,835	2813,829	-	4,00	0,750
	15-01-2022	284661,032	5920678,253	2807,252	-6,577	6,00	1,003
	06-04-2022	284660,840	5920677,639	2803,827	-3,425	-	4,31
	Total período				-10,002		-
B7	24-10-2021	284451,627	5920333,553	2662,847	-	5,00	0,894
	15-01-2022	*	*	*	*	*	*
	06-04-2022	*	*	*	*	*	*
B8	24-10-2021	284821,646	5920559,469	2802,294	-	5,00	0,813
	15-01-2022	*	*	*	*	*	*
	06-04-2022	*	*	*	*	*	*
B2A**	24-10-2021	-	-	-	-	-	-
	15-01-2022	284782,696	5920449,849	2759,824	-	5,00	0,135
	06-04-2022	284783,383	5920449,245	2755,989	-3,835	-	-

* Posición de balizas perdidas por ablación del glaciar.

En base a los valores de emergencia por cada período de análisis, se elaboró un balance de masa por baliza, considerando las densidades especificadas en la metodología. Dadas las diferencias en el adelgazamiento con respecto a las mediciones GNSS, los resultados de Tabla 3 representan un el límite inferior de pérdida en cada período, aunque claramente se detecta que el período octubre-enero concentra las mayores pérdidas.

Tabla 3: Balance glaciológico por baliza, período octubre 2021 a abril 2022.

Baliza	Densidad (kg/m ³)	Octubre-Enero (m.eq.a.)	Enero-Abril (m.eq.a.)	Total (m.eq.a.)
B1	510	-2,39	-1,62	-4,01
	680	-3,19	-2,16	-5,35

Baliza	Densidad (kg/m ³)	Octubre- Enero (m.eq.a.)	Enero- Abril (m.eq.a.)	Total (m.eq.a.)
	850	-3,99	-2,70	-6,69
B2	510	-2,45	-	-
	680	-3,26	-	-
	850	-4,08	-	-
B3	510	-2,39	-2,19	-4,58
	680	-3,19	-2,92	-6,11
	850	-3,99	-3,66	-7,65
B4	510	-2,96	-1,85	-4,81
	680	-3,94	-2,46	-6,4
	850	-4,93	-3,08	-8,01
B5	510	-2,39	-1,69	-4,08
	680	-3,19	-2,25	-5,44
	850	-3,99	-2,81	-6,8
B7	510	-	-	-
	680	-	-	-
	850	-	-	-
B8	510	-	-	-
	680	-	-	-
	850	-	-	-
B2A	510	-	-2,6	-
	680	-	-3,47	-
	850	-	-4,34	-

La Tabla 4 y la Figura 6 muestran los resultados del cálculo de velocidades en base a la posición de las balizas que se pudieron seguir durante todo el período de estudio. Allí, se observa que los desplazamientos fueron significativamente mayores durante el período octubre 2021 a enero 2022, incluso en un par de casos más de 4 veces lo calculado entre enero 2022 y abril 2022. La baliza 2 presentó el mayor valor, con más de 15 cm por día entre octubre 2021 y enero 2022, mientras que la baliza 5 mostró el desplazamiento menor, inferior a 1 cm por día entre enero y abril 2022.

Tabla 4: Desplazamientos GNSS balizas de ablación entre octubre 2021 y abril 2022.

Balizas	Periodo campañas	Desplazamiento Horizontal total (m)	Nº de días entre campañas	Velocidad (m/día)
B1	oct21-ene22	7,624	83	0,092
	ene22-abr22	1,980	81	0,024

Balizas	Periodo campañas	Desplazamiento Horizontal total (m)	Nº de días entre campañas	Velocidad (m/día)
B2	oct21-abr22	9,526	164	0,058
	oct21-ene22	13,924	83	0,168
	ene22-abr22	*	81	*
	oct21-abr22	*	164	*
B3	oct21-ene22	1,403	83	0,017
	ene22-abr22	1,389	81	0,017
	oct21-abr22	2,766	164	0,017
B4	oct21-ene22	7,021	83	0,085
	ene22-abr22	1,237	81	0,015
	oct21-abr22	8,052	164	0,049
B5	oct21-ene22	2,785	83	0,034
	ene22-abr22	0,643	81	0,008
	oct21-abr22	3,308	164	0,020
B7	oct21-ene22	*	83	*
	ene22-abr22	*	81	*
	oct21-abr22	*	164	*
B8	oct21-ene22	*	83	*
	ene22-abr22	*	81	*
	oct21-abr22	*	164	*
B2A	oct21-ene22	*	83	*
	ene22-abr22	0,915	81	0,011
	oct21-abr22	*	164	*

* indica imposibilidad de comparar.

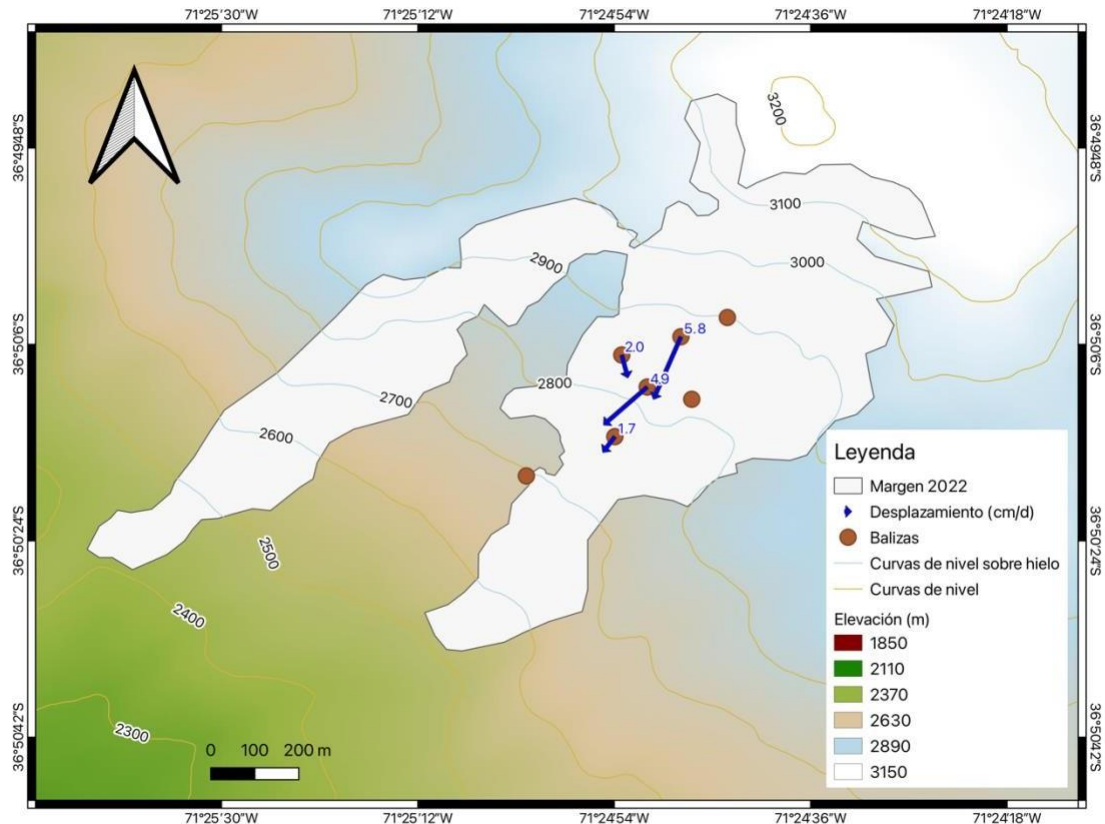


Figura 6: Mapa indicando ángulo y magnitud del desplazamiento de balizas durante el período de estudio. La posición de balizas corresponde a aquellas instaladas en octubre 2021. La escala que representa la longitud de cada flecha se aprecia en la leyenda.

B. Mediciones con LiDAR y balance geodésico

Con los datos LiDAR procesados se calculó y analizó la diferencia altimétrica entre el final de verano de 2021 (abril), el final del invierno de ese mismo año (octubre) y el final del verano del 2022 (abril) cubriéndose, así, un año hidrológico completo (Figura 7). El cálculo, empleando como dominio espacial el margen del glaciar en 2021, solo pudo ser calculado para un rango de entre 41 a 49% del área del glaciar. El cambio de espesor promedio de invierno (octubre 2021 - abril 2021) es positivo, con un valor de 2,62 m, con una dispersión (desviación estándar) de ± 262 m. El 86,7% del área comparada en invierno gana elevación, mientras las zonas negativas, un 13,6%, se tienden a aglomerar en las áreas más altas, el puente que une los fragmentos del glaciar, el quiebre de pendiente que separa la zona de hielo más limpio de aquel recubierto, y en la zona inferior del fragmento NW del glaciar. Empleando 510 kg/m^3 como valor de densidad de nieve, el balance promedio de invierno es 1,34 m.eq.a., con una desviación estándar de 1,34 m.eq.a, con ganancias máximas de 6,85 m.eq.a., pérdida máxima de -6,81 m.eq.a. En el caso del período estival, se produjeron pérdidas que generalmente eliminaron las ganancias de invierno. Con un adelgazamiento promedio de -6,62 m y una dispersión de 3,78 m, el balance de masa promedio empleando una densidad de 850 kg/m^3 es -

5,62 m.eq.a., con una dispersión de 3,21 m.eq.a., una pérdida máxima de -15,71 m.eq.a. y una ganancia máxima de 6,83 meq.a. Así, la reducción entre abril 2022 y octubre 2021 tiende a doblar (en valores absolutos) las ganancias de invierno. En ese período, un 97,84% del área comparada muestra un cambio negativo, mientras que los pocos lugares con ganan masa se localizan en los márgenes NW en ambos brazos del glaciar.

A consecuencia de esta dinámica, el balance anual 2021-2022 resulta ampliamente negativo, con un adelgazamiento promedio de -3,75 m con dispersión, expresada en una desviación estándar equivalente a 2,54 m. Esto da un balance de masa promedio de -3,19 m.eq.a. usando una densidad de 850 kg/m^3 , o -1,91 m.eq.a., empleando un valor de densidad de 510 kg/m^3 . Las zonas de ganancias corresponden a un 4,64% del área de comparación, y están concentradas en las secciones de cotas más bajas de aquella zona. También, se observan pixeles positivos aislados en la zona más alta, más algunos agrupamientos en la zona del puente de hielo. Este patrón espacio temporal sugiere que el glaciar pasa de condiciones extremas de acumulación a ablación en prácticamente toda su masa durante el año hidrológico, aunque en el balance anual la tendencia es negativa. Entre un 15 a 95% de la pérdida de masa se detectó en verano. Este paso de condiciones extremas se puede observar con más claridad a través del análisis de distribución hipsométrica del cambio de espesor (Figura 8). A toda elevación el balance pasa de condiciones positivas en invierno, a negativas en verano. El patrón altimétrico de invierno muestra generalmente un aumento de la acumulación conforme a la elevación, aunque sobre los 3050 m.s.n.m la tendencia se revierte. Durante el verano, las máximas pérdidas también tienden a ser mayores en las cotas más altas, sugiriendo que gran parte de esta corresponde a fusión estacional de nieve. El balance anual resultó en un máximo negativo entre las bandas 2850-3050 m, mientras que el mínimo de pérdida ocurrió en la banda 2550. Es en esas bandas más bajas donde se observa una menor pérdida anual, lo que coincide con el inicio de la zona más cubierta de detritos.

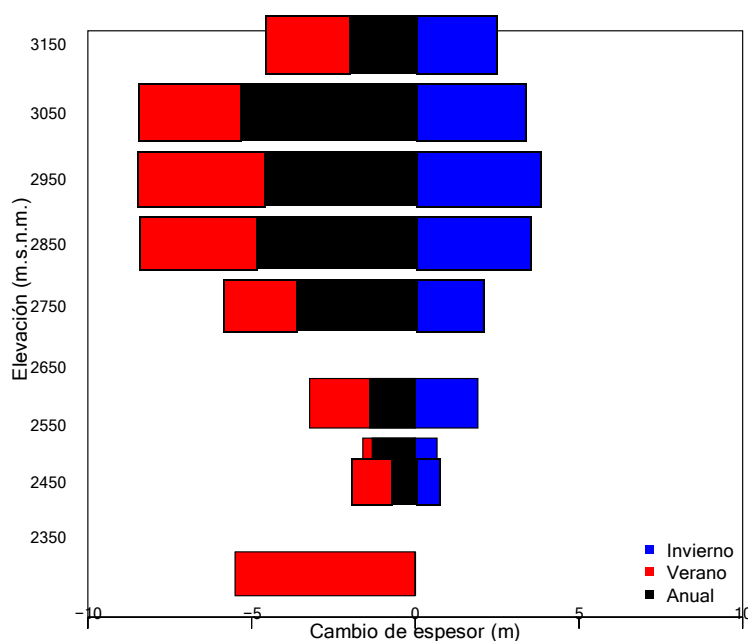


Figura 8: Distribución altitudinal del cambio de espesor según la sustracción de datos LiDAR. Elevaciones en metros sobre el nivel del mar. Dada las diferencias entre coberturas de levantamientos LiDAR en cada campaña, la representación en cada rango difiere, lo que se observa, por ejemplo, a los 2350 m.s.n.m. donde solo hubo cobertura para determinar diferencias en verano.

Estos cambios extremos de balance que se detectaron en todo el cuerpo de hielo permiten sugerir razones por las cuales la balizas instaladas en octubre 2021 no estaban en pie durante la visita de enero 2022. Las zonas donde estuvieron instaladas aquellas balizas coinciden con las bandas de máximos negativos, donde se registraron diferencias de altura de entre 7 a 13 metros, bastante más que las profundidades de instalación de aproximadamente 4 a 5 metros (Tabla 2). Estos valores superan ampliamente valores estimados en el estudio del período 2021/2022 (DGA, 2022). El resumen del balance geodésico se presenta en la Tabla 5.

Tabla 5: Resumen del balance geodésico 2021-2022. Todos los valores de balance están en m.eq.a., usando dos densidades: 850 kg/m³ y 510 kg/m³, con esta última indicada en los paréntesis.

Periodo (mes/año)	Promedio	Máximo positivo	Máximo negativo	Desviación estándar	Área mapeada sobre el glaciar (%)	Área mapeada con valores negativos (%)*	Área mapeada con valores positivos (%)*
04/21- 10/21	2.23 (1,34)	11,42 (6,85)	-11,34 (- 6,81)	±2,32 (1.34)	41%	13,2	86,72
10/21- 04/22	-5,62(- 3,38)	6,83(4,1)	-15,51(- 9,31)	±3,21(1,93)	49%	97,84	2,16
04/21- 04/22	-3.19 (- 1,91)	3,22 (1,93)	-62,56 (- 37,53)	±2,15 (1,3)	41%	95,36	4,64

* Calculados relativo al área cubierta en cada período

La comparación entre el balance geodésico determinado de las posición GNSS de cada baliza y su contraparte glaciológica, indica que durante el período octubre 2021 y enero 2022 la diferencia fue significativa, con las balizas cuyas posiciones fueron detectadas, B1, B2, B3, B4 y B5, dando diferencias (usando 510 kg/m³ como densidad) de entre -1,7 m.eq.a., -3,9 m.eq.a., -0,76 m.eq.a., -1,39 m.eq.a., y -0,95 m.eq.a., respectivamente. Por su parte, durante el período enero-abril 2022, las balizas reinstaladas y posteriormente encontradas para su medición, fueron las 1, 3, 4, y 5, en las cuales la diferencia entre balances fue mucho menor, con magnitudes de (usando 850 kg/m³ como densidad) 0,42 m.eq.a., 1,6 m.eq.a., -0,21 m.eq.a., y -0,09 m.eq.a. Durante la determinación del balance geodésico, también se realizó una comparación entre los cambios de espesor computados desde los datos LiDAR, y perfiles GNSS cinemáticos realizados sobre el glaciar (Tabla 6). Los resultados indican diferencias inferiores a ±0,4 m (RMSE), en que los sesgos máximos son positivos aunque inferiores al metro. La diferencia promedio durante octubre 2021 resultó muy similar a la

desviación estándar, lo que indica una distribución normal de las diferencias. En el caso del levantamiento de abril 2022, la distribución está más sesgada hacia valores positivos.

Tabla 6: Diferencias entre datos GNSS (cinemáticos) y levantamiento LiDAR

Periodo	N° de puntos coincidencias (muestra)	Mínimo	Máximo	Diferencia Promedio	RMSE	Desviación estándar
10/2021	398 de 452	-0,367	0,546	0,140	±0,228	0,180
04/2022	1785 de 1905	-0,403	0,879	0,341	±0,387	0,182

C. Variaciones areales del glaciar

Del análisis combinado entre la imagen satelital y el mosaico del vuelo drone, se pudo interpretar que el borde del glaciar tiene un frente difuso, caracterizado por una zona con detrito recubierto que comienza en el quiebre de pendiente cercano a la posición de la baliza 7 (Figura 9). Es importante destacar que, dada la imposibilidad acceder caminando a esa zona del glaciar, como consecuencia de las altas pendientes, resulta difícil identificar el borde inferior. El criterio que se usó para la interpretación del mosaico fue encontrar el límite entre formas que parecen típicas de hielo recubierto, tales como escarpes de hielo, y formas que representan terreno más estable, como afloramientos rocosos. La incorporación de esta interpretación solo fue posible porque la imagen drone permitió distinguir rasgos inferiores a 1 metro, nivel de detalle imposible de lograr por las imágenes empleadas en estudios previos (e.g. De Moraes et al., 2020). A pesar de esta mejor resolución, sin embargo, sigue habiendo incertidumbre en la determinación del margen inferior. Considerando esta área recubierta, el glaciar ha mantenido relativa estabilidad de superficie en relación a 2021. En relación a 1975, el área 2022, incluyendo la zona interpretada como recubierta, equivale a una reducción del 63,8%. Las pérdidas totales para periodos similares a aquellos presentados en estudios recientes, que analizaron los cambios en todo el complejo volcánico, son generalmente mayores (Reinthal et al., 2019), lo que se atribuye a que el presente estudio realizó un análisis de mayor detalle en base a interpretación morfológica visual (Tabla 7).

Tabla 7: Variaciones de superficie y frente analizadas en este estudio. Valores anteriores al año 2021 provienen de DGA (2022)

Año	Área (km ²)	Cambio de área (km ² a ⁻¹)	Longitud (m)	Tasa cambio longitud (ma ⁻¹)	Altura mínima (m)
1975	2,78		3152		2210
1985	1,75	-0,103	2442	-71	2260

Año	Área (km ²)	Cambio de área (km ² a ⁻¹)	Longitud (m)	Tasa cambio longitud (ma ⁻¹)	Altura mínima (m)
1989	1,53	-0,055	2377	-16,3	2353
1998	1,19	-0,034	2236	-14,1	2514
2001	1,17	-0,007	2183	-17,7	2391
2003	1,04	-0,065	1538	-322,5	2452
2011	0,99	-0,006	2103	70,6	2370
2016	0,68	-0,062	1382	-144,2	2601
2019	0,54	-0,043	1687	101,7	2620
2021	1,14	+0,06	1687	0	2504
2022	1,007	0,133	1448	-39	2522

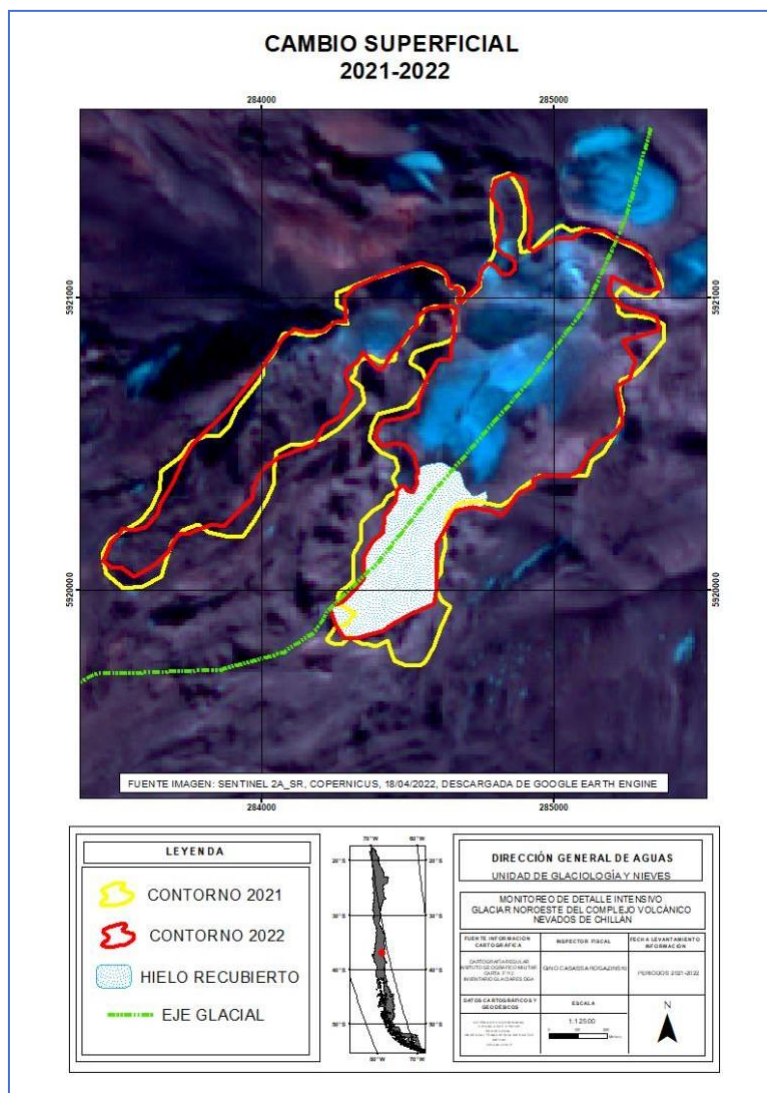


Figura 9: Cambio superficial 2021-2022, considerando área interpretada como cubierta por detritos. Se incluye la línea de flujo central determinada por DGA (2022) para el año 1975, y utilizada para los cálculos de cambio de frente.

8. Discusión y conclusiones

Durante el período 2021-2022, los análisis de imágenes satelitales, balance geodésico y glaciológico, arrojan que el glaciar CL108116004 continúa con un proceso de pérdida de masa significativo. La combinación de la interpretación de imágenes satelitales y vuelos drone sugiere la existencia de una zona frontal cubierta por detritos que es más grande que lo previamente estimado, aunque sigue siendo un desafío determinar fehacientemente el fin del margen frontal. El resultado de aquel análisis indica que el glaciar se ha mantenido relativamente estable en su superficie, con incertidumbres varios órdenes de magnitud inferiores al cambio detectado entre 2021 y 2022. El análisis utilizando la combinación de imágenes Sentinel y drone permitió precisar de mejor forma la existencia de una zona frontal recubierta. Esto obligó a reinterpretar los márgenes de 2021, que en este informe indican un área más del doble superior a lo indicado en DGA (2022).

Usando estos nuevos márgenes, se pudo estudiar al balance geodésico invernal, estival y anual, para el período 2021-2022 para una superficie de entre 41% a 49% del glaciar, identificando una pérdida de masa significativa, con valores superiores a -60 m.eq.a. en algunos casos. La pérdida entre enero y abril 2022 tiene magnitudes similares a aquellos de enero a abril 2021 y son comparables a previos resultados obtenidos en glaciares cercanos (Caro, 2017; DGA, 2022). Sin embargo, esta es la primera vez que en esta zona se pudo medir el balance de octubre-enero mediante GNSS tomados en la posición de las balizas, donde se pudo determinar que gran parte de la pérdida de masa anual ocurrió en ese período. Estos datos de cambio altimétrico indican zonas de pérdida tanto en invierno como en verano. El balance también muestra pérdida a toda elevación para el período anual pero con una alta variabilidad estacional, ya que durante invierno todo el cuerpo tiende a ganar masa, mientras que durante el verano ocurre todo lo contrario. De la misma forma, estas mediciones permitieron estudiar las velocidades del glaciar en las posiciones de las balizas, evidenciando que desplazamientos fueron significativamente mayores durante el período octubre 2021 a enero 2022, comparado con el resto del período observado.

La comparación entre los balances glaciológico y geodésico en base a GNSS indica consistencia en la tendencia de pérdida, aunque mucho mayor en el período enero-abril 2022 dado que varias balizas se mantuvieron erguidas sobre el hielo durante ese período, permitiendo la repetición de mediciones. Mientras durante el primer período de medición (octubre 2021 – enero 2022) se estima un sesgo promedio de -1,74 m.eq.a. (usando densidad de 510 kg/m^3), debido a que la pérdida total de balizas obligó a asumir el largo de ellas como valor mínimo de ablación, ya para enero-abril 2022 el sesgo promedio fue positivo, pero más cercano a cero, 0,43 m.eq.a. (usando densidad de 850 kg/m^3).

Los resultados aquí presentados indican que el glaciar CL108116004 está siendo sometido a una tendencia de balance de masa negativo que es consecuencia de un aumento de las condiciones de ablación durante el verano, que eliminan casi completamente las ganancias de nieve invernal. Esta tendencia se debe en parte a la baja altitud del complejo Nevados de Chillán, que genera condiciones de extrema

sensibilidad a la elevación de la isoterma de cero grados, que probablemente en verano supera la cumbre. Una extrapolación de la temperatura media de la estación DGA Las Trancas (~1250 m.s.n.m) empleando varios gradientes lineales que se reportan en la literatura (Fernández y Mark, 2016), desde -5,5 K/km a -7,5 K/km, indican que entre un 27% a 67% del período octubre 2021 a abril 2022, la isoterma se localizó sobre la cumbre (Figura 11). Si se considera solo el período entre octubre 2021 y enero 2022, esa proporción llega hasta 78%.

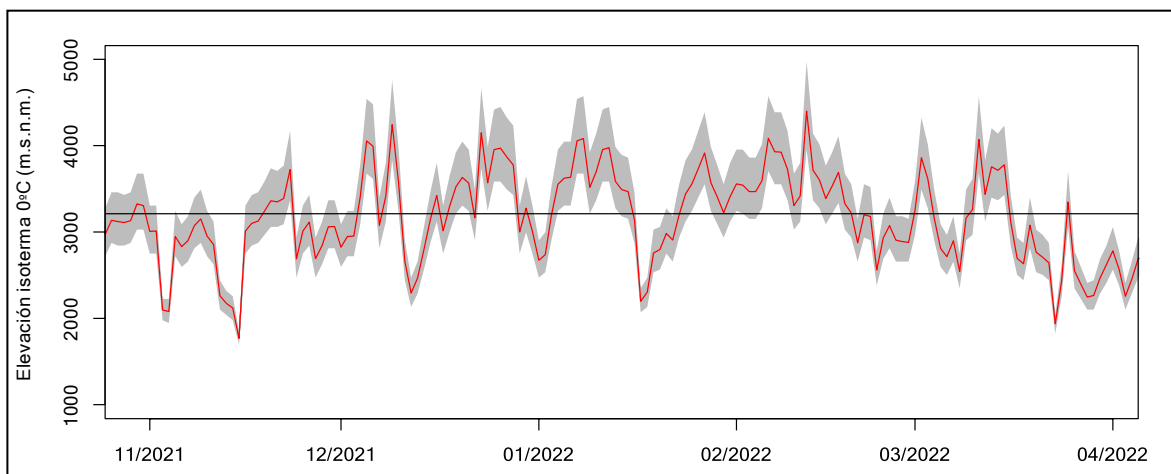


Figura 10: Elevación de la isoterma de cero grados, extrapolada aplicando gradientes de temperatura a los datos disponibles en la estación Las Trancas⁴. La línea roja representa la extrapolación empleando un valor de -6,5K/km, mientras que el polígono gris el rango posible considerando -5,5K/km y -7,5K/km. La línea horizontal negra indica la altitud de la cumbre de los Nevados de Chillán.

De esta forma, continuar con la observación de este glaciar permitirá estudiar mejor las condiciones meteorológicas que causan los cambios en el balance de masa, su interacción con la topografía y las condiciones del terreno, como es el caso de la cobertura detrítica. Gracias a la combinación de levantamientos LiDAR, balizas, GNSS, imágenes satelitales y drones, se hace ahora posible caracterizar el glaciar a alto detalle, permitiendo así obtener una base para comprender las tendencias de la macrozona glaciológica sur.

⁴ Obtenidos desde <https://snia.mop.gob.cl> el 23 de septiembre de 2022.

9. Referencias bibliográficas

Barria, I., Carrasco, J., Casassa, G. and Barria, P.: Simulation of Long-Term Changes of the Equilibrium Line Altitude in the Central Chilean Andes Mountains Derived From Atmospheric Variables During the 1958–2018 Period, *Front. Environ. Sci.*, 7(October), doi:10.3389/fenvs.2019.00161, 2019.

Bojinski, S., Verstraete, M., Peterson, T. C., Richter, C., Simmons, A. and Zemp, M.: The concept of essential climate variables in support of climate research, applications, and policy, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 95(9), 1431–1443, doi:10.1175/BAMS-D-13-00047.1, 2014.

Bown, F., Rivera, A. and Acuña, C.: Recent glacier variations at the Aconcagua basin, central Chilean Andes, *Ann. Glaciol.*, 48(1), 43–48, doi:10.3189/172756408784700572, 2008.

Braun, M. H., Malz, P., Sommer, C., Farías-Barahona, D., Sauter, T., Casassa, G., Soruco, A., Skvarca, P. and Seehaus, T. C.: Constraining glacier elevation and mass changes in South America, *Nat. Clim. Chang.*, 9(2), 130–136, doi:10.1038/s41558-018-0375-7, 2019.

Caro, A.: Estudios glaciologicos en los Nevados de Chillan, Universidad de Chile., 2017.

Carrasco, J. F., Osorio R., and Casassa G. Secular trend of the equilibrium-line altitude on the western side of the southern Andes, derived from radiosonde and surface observations. *J. Glacio.*, 54(186), 538–550, doi: 10.3189/002214308785837002, 2008.

Casassa, G., López, P., Pouyaud, B. and Escobar, F.: Detection of changes in glacial run-off in alpine basins: examples from North America, the Alps, central Asia and the Andes, *Hydrol. Process.*, 23(1), 31–41, doi:10.1002/hyp.7194, 2009.

CECs: Variaciones recientes de glaciares en Chile según principales zonas glaciológicas, Dirección General de Aguas -MOP., 2011.

CECS: Estrategia nacional de glaciares, Dirección General de Aguas -MOP., 2009.

Cogley, J. G., Hock, R., Rasmussen, L. A., Arendt, A. A., Bauder, A., Braithwaite, R. J., Jansson, P., Kaser, G., Möller, M., Nicholson, L. and Zemp, M.: Glossary of glacier mass balance and related terms., 2011.

Cuffey, K. M. and Paterson, W. S. B.: *The Physics of Glaciers*, 4th ed., Butterworth-Heinemann, Burlington., 2010.

DGA-UCHILE. Modelación del Balance de Masa y la Descarga de Agua en Glaciares de Chile Central, 2012.

DGA: Monitoreo De Detalle Del Glaciar Noroeste Del Complejo Volcánico Nevados De Chillán, 2020-2021, Región De Ñuble., 2022.

Dussaillant, I., Berthier, E., Brun, F., Masiokas, M. and Hugonnet, R.: Two decades of glacier mass loss along the Andes, *Nat. Geosci.*, 21, 5143, doi:10.1038/s41561-019-0432-5, 2019.

Fernández, A. and Mark, B. G.: Modeling modern glacier response to climate changes along the Andes Cordillera: A multiscale review, *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 8(1), 467–495, doi:10.1002/2015MS000482, 2016.

Garreaud, R. D., Boisier, J. P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H. H. and Veloso-Aguila, D.: The Central Chile Mega Drought (2010–2018): A climate dynamics perspective, *Int. J. Climatol.*, 40(1), 421–439, doi:10.1002/joc.6219, 2020.

Gascoin, S., Kinnard, C., Ponce, R., Lhermitte, S., MacDonell, S. and Rabatel, A.: Glacier contribution to streamflow in two headwaters of the Huasco River, Dry Andes of Chile, *Cryosph.*, 5(4), 1099–1113, doi:10.5194/tc-5-1099-2011, 2011.

Haeberli, W., Hoelzle, M., Paul, F. and Zemp, M.: Integrated monitoring of mountain glaciers as key indicators of global climate change: the European Alps, *Ann. Glaciol.*, 46, 150–160, doi:10.3189/172756407782871512, 2007.

Huss, M.: Density assumptions for converting geodetic glacier volume change to mass change. *Cryosph.*, 7(3), 877–887, doi: 10.5194/tc-7-877-2013, 2013.

Immerzeel, W. W., Lutz, A. F., Andrade, M., Bahl, A., Biemans, H., Bolch, T., Hyde, S., Brumby, S., Davies, B. J., Elmore, A. C., Emmer, A., Feng, M., Fernández, A., Haritashya, U., Kargel, J. S., Koppes, M., Kraaijenbrink, P. D. A., Kulkarni, A. V., Mayewski, P. A., Nepal, S., Pacheco, P., Painter, T. H., Pellicciotti, F., Rajaram, H., Rupper, S., Sinisalo, A., Shrestha, A. B., Viviroli, D., Wada, Y., Xiao, C., Yao, T. and Baillie, J. E. M.: Importance and vulnerability of the world's water towers, *Nature*, 577(7790), 364–369, doi:10.1038/s41586-019-1822-y, 2020.

Kalacska, M., Lucanus, O., Arroyo-Mora, J. P., Laliberté, É., Elmer, K., Leblanc, G. and Groves, A.: Accuracy of 3d landscape reconstruction without ground control points using different uas platforms, *Drones*, 4(2), 1–26, doi:10.3390/drones4020013, 2020.

Lliboutry, L.: Nieves y glaciares de Chile. Fundamentos de Glaciología, Ediciones de la Universidad de Chile, Santiago., 1956.

Mark, B. G. and Fernández, A.: The significance of mountain glaciers as sentinels of climate and environmental change, *Geogr. Compass*, 11(6), e12318, doi:10.1111/GEC3.12318, 2017.

Masiokas, M. H., Rabatel, A., Rivera, A., Ruiz, L., Pitte, P., Ceballos, J. L., Barcaza, G., Soruco, A., Bown, F., Berthier, E., Dussaillant, I. and MacDonell, S.: A Review of the Current State and Recent Changes of the Andean Cryosphere, *Front. Earth Sci.*, 8(June),

1–27, doi:10.3389/feart.2020.00099, 2020.

De Moraes, M., Lara, C., Paredes, A. and Broitman, B.: EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LOS GLACIARES DEL COMPLEJO VOLCÁNICO NEVADOS DE CHILLÁN, Rev. Geográfica Chile Terra Aust., 56(1), 5–13, doi:10.23854/07199562.2020561.DeMoraes5, 2020.

Ohlanders, N., Rodriguez, M. and McPhee, J.: Stable water isotope variation in a Central Andean watershed dominated by glacier and snowmelt, Hydrol. Earth Syst. Sci., 17(3), 1035–1050, doi:10.5194/hess-17-1035-2013, 2013.

Ostrem, G. and Brugman, M.: Glacier Mass-Balance Measurements: A manual for field and office work, Saskatoon., 1991.

Permana, D. S., Thompson, L. G., Mosley-Thompson, E., Davis, M. E., Lin, P., Nicolas, J. P., Bolzan, J. F., Bird, B. W., Mikhalevko, V. N., Gabrielli, P., Zagorodnov, V., Mountain, K. R., Schotterer, U., Hanggoro, W., Habibie, M. N., Kaize, Y., Gunawan, D., Setyadi, G., Susanto, R. D., Fernández, A. and Mark, B. G.: Disappearance of the last tropical glaciers in the Western Pacific Warm Pool (Papua, Indonesia) appears imminent, Proc. Natl. Acad. Sci., 116(52), 26382–26388, doi:10.1073/pnas.1822037116, 2019.

Reinthal, J., Paul, F., Granados, H. D., Rivera, A. and Huggel, C.: Area changes of glaciers on active volcanoes in Latin America between 1986 and 2015 observed from multi-temporal satellite imagery, J. Glaciol., 65(252), 542–556, doi:10.1017/jog.2019.30, 2019.

Rivera, A. and Bown, F.: Recent glacier variations on active ice capped volcanoes in the southern volcanic zone (37°–46°S), Chilean Andes, J. South Am. Earth Sci., 45, 345–356, doi:10.1016/j.jsames.2013.02.004, 2013.

Schumacher, V., Justino, F., Fernández, A., Meseguer-Ruiz, O., Sarricolea, P., Comin, A., Peroni Venancio, L. and Althoff, D.: Comparison between observations and gridded data sets over complex terrain in the Chilean Andes: Precipitation and temperature, Int. J. Climatol., 40(12), 5266–5288, doi:10.1002/joc.6518, 2020.

Segovia, A. and Videla, Y.: Caracterización glaciológica de Chile, Investig. Geográficas, 24, 3–24, 2017.

SERNAGEOMIN: Chile: territorio volcánico, SERNAGEOMIN., 2018.

Thornton, J. M., Palazzi, E., Pepin, N. C., Cristofanelli, P., Essery, R., Kotlarski, S., Giuliani, G., Guigoz, Y., Kulonen, A., Pritchard, D., Li, X., Fowler, H. J., Randin, C. F., Shahgedanova, M., Steinbacher, M., Zebisch, M. and Adler, C.: Toward a definition of Essential Mountain Climate Variables, One Earth, doi:10.1016/j.oneear.2021.05.005, 2021.

Valdés-Pineda, R., Pizarro, R., García-Chevesich, P., Valdés, J. B., Olivares, C., Vera, M., Balocchi, F., Pérez, F., Vallejos, C., Fuentes, R., Abarza, A. and Helwig, B.: Water

governance in Chile: Availability, management and climate change, *J. Hydrol.*, 519, 2538–2567, doi:10.1016/j.jhydrol.2014.04.016, 2014.

Ye, Q., Kang, S., Chen, F. and Wang, J.: Monitoring glacier variations on Geladandong mountain, central Tibetan Plateau, from 1969 to 2002 using remote-sensing and GIS technologies, *J. Glaciol.*, 52(179), 537–545, doi:10.3189/172756506781828359, 2006.

Zenteno, P., Rivera, A. and García, R.: Glacier Inventory of the Itata basin derived from satellite imagery: historical trends and recent variations at nevados de Chillán volcano (36° 56' S - 71° 20' W), in VIII Congreso Internacional de Ciencias de la Tierra., 2004.

10. Anexos

Los directorios con archivos entregados junto a este informe corresponden a los anexos, y se organizan de la siguiente manera:

Directorio: ANEXOS

→ Subdirectorio: Balance_Glaciologico

Contiene shapefiles con los puntos GNSS de las balizas tomados en cada campaña

→ Subdirectorio: Balance_Geodesico

Contiene los MDEs de diferencia para el balance 2021-2022

→ Subdirectorio: Fotografias

Contiene las fotografías originales de las figuras presentadas en el informe.

→ Subdirectorio: Imágenes_Satelitales

Contiene composiciones falso color de las escenas 2021 y 2022 empleadas para la interpretación de márgenes glaciares. Incluye el mosaico drone empleado en 2022.

→ Subdirectorio: Margenes

Contiene shapefiles de los márgenes de glaciares presentados en este trabajo