



GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS DIRECCIÓN
GENERAL DE AGUAS

**MONITOREO DE DETALLE INTENSIVO DEL
GLACIAR SUR-ORIENTAL DEL VOLCÁN
MOCHO, REGIÓN DE LOS RÍOS, MACROZONA
SUR, 2021-2022**

REALIZADO POR:
UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE
S.I.T. N° 526

Santiago, Agosto 2022

MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS

Ministro de Obras Públicas

Sr. Juan Carlos García

Director General de Aguas

Sr. Rodrigo Sanhueza Bravo

Jefe Unidad de Glaciología y Nieves

Sr. Gino Casassa Rogazinski

Inspector Fiscal (S)

Sr. Jorge Huenante Gutiérrez

UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE

Jefe de Proyecto

Sr. Marius Schaefer

Profesionales

Sr. José Luis Rodríguez Lagos

Sr. Jorge Berkhoff Leal

Sra. Guisella Gacitúa



Citar este informe como sigue:

Dirección General de Aguas (DGA), 2022. **MONITOREO DE DETALLE INTENSIVO DEL GLACIAR SUR-ORIENTAL DEL VOLCÁN MOCHO, REGIÓN DE LOS RÍOS, MACROZONA SUR, 2021-2022**, SIT N°526, 2022. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Unidad de Glaciología y Nieves. Realizado por: UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE

	Página
ÍNDICE	ii
ÍNDICE DE TABLAS	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	2
2.1. Objetivo General	2
2.2. Objetivos Específicos	2
3. METODOLOGÍA.....	5
3.1. Variación Areal 2021 al 2022	5
3.1.1. Corrección Atmosférica	6
3.1.2. Combinación de Colores	7
3.1.3. Delimitación del Glaciar Mocho.....	7
3.2. Balance de Masa Glaciológico Temporada 2021-2022.....	8
3.2.1. Sitios de Medición de Ablación	10
3.2.2. Medición de Ablación	10
3.2.3. Medición de Espesor de Nieve con Ground Penetrating RADAR (GPR)	10
3.2.4. Cálculo de la Incertidumbre del Balance de Masa Glaciológico	12
3.3. Balance de Masa Geodésico	13
3.4. Comparación de Resultados del Balance de Masa.....	14
3.5. Adquisición y Procesamiento de Datos GNSS.....	14
4. RESULTADOS	16
4.1. Variación Areal 2021 al 2022	16
4.2. Balance de Masa Glaciológico Temporada 2021-2022.....	18
4.2.1. Sitios de Medición de Ablación	18
4.2.2. Medición de Ablación	19

4.2.3.	Medición de Espesor de Nieve con RADAR	19
4.2.4.	Balance de masa glaciológico glaciar Mocho.....	22
4.3.	Balance de Masa Geodésico	23
4.4.	Comparación de Resultados del Balance de Masa.....	28
4.4.1.	Balances de masa glaciológico y geodésico	29
4.4.2.	GPR y Balance de masa geodésico.....	32
4.5.	Mediciones con GPS GNSS	32
5.	PLAN DE CONTINGENCIA Y TRABAJO SEGURO	37
5.1.	Antecedentes Generales	37
5.2.	Objetivos.....	38
5.2.1.	Objetivo General	38
5.2.2.	Objetivos Específicos	38
5.3.	Vigencia del Plan	38
5.4.	Identificación de Escenarios.....	39
5.4.1.	Ubicación Geográfica de la Zona.....	39
5.4.2.	Identificación y Descripción de Escenarios posibles	40
5.5.	Estrategia de Respuesta	40
5.5.1.	Medios de Telecomunicación	40
5.5.2.	Evaluación y Respuesta.....	41
5.6.	Planes Sectoriales.....	41
5.6.1.	Plan de Contingencia por Variable Volcánica Mocho.....	41
5.6.2.	Plan de Contingencia por Emergencia Sanitaria (COVID-19)	41
5.7.	Coordinación.....	41
6.	CONCLUSIONES	42
7.	BIBLIOGRAFÍA	44
	ANEXO I.....	46



ANEXO II.....	58
ANEXO III.....	61

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-A. Carta Gantt	5
Tabla 3.1-A. Características de las imágenes Sentinel	6
Tabla 3.1.2-A. Combinación de bandas utilizadas en Imágenes Sentinel	7
Tabla 4.1-A. Resumen de las variaciones areales del glaciar.....	16
Tabla 4.2.2-A. Balance de masa en balizas, temporada estival 2021-2022.	19
Tabla 4.2.4-A. Valores de balances de masa glaciológico	22
Tabla 4.3-A. Diferencias entre GPS cinemático y LiDAR.....	24
Tabla 4.3-B. Resumen de la densidad utilizada en el balance de masa geodésico de verano 2021-2022	25
Tabla 4.3-C. Resumen de cambios de volumen y balance de masa geodésico para cada periodo	26
Tabla 4.4.1-A. Comparación de balances de masa glaciológico y geodésico	29
Tabla 4.4.2-A. Resumen de la acumulación medida mediante dos métodos.	32
Tabla 4.5-A. Coordenadas de las balizas obtenidas por las mediciones GNNS	33
Tabla 4.5-B. Desplazamiento y velocidades estimadas.....	35
Tabla 4.5-C. Variación vertical medida con GNSS.....	36
Tabla 5.3-A. Vigencia del plan de contingencia y trabajo seguro	38
Tabla 5.4.2-A. Descripción de Escenarios y Amenazas.	40
Tabla 5.5.1-A. Medios de Telecomunicación	40
Tabla A I-A. Campañas de terreno temporada 2021-2022.....	46
Tabla A I-B. Medición de altura de balizas del glaciar Mocho octubre 2021	48
Tabla A I-C. Medición de densidad de nieve en B18 con muestreador metálico tipo cuña, octubre 2021.	49
Tabla A I-D. Medición de altura de balizas del glaciar Mocho noviembre 2021.....	50
Tabla A I-E. Medición de densidad de nieve en B18 con muestreador metálico tipo cuña, noviembre 2021.	50
Tabla A I-F. Medición de altura de balizas del glaciar Mocho diciembre 2021.....	53
Tabla A I-G. Medición de densidad de nieve en B18 con muestreador metálico tipo cuña, diciembre 2021.	54
Tabla A I-H. Medición de altura de balizas del glaciar Mocho febrero 2022.....	55



Tabla A I-I. Medición de densidad de nieve en B19 con muestreador metálico tipo cuña, febrero 2022.....	55
Tabla A I-J. Medición de altura de balizas del glaciar Mocho abril 2022.	57
Tabla A I-K. Medición de densidad de nieve en B19 con muestreador metálico tipo cuña, abril 2022.....	57
Tabla A III-A. Estadística de temperatura estación B18 sobre el glaciar	61
Tabla A III-B. Estadística de humedad relativa estación B18 sobre el glaciar	62
Tabla A III-C. Estadística de radiación de onda corta estación B18 sobre el glaciar.....	63
Tabla A III-D. Estadística de velocidad del viento estación B18 sobre el glaciar.....	64
Tabla A III-D. Estadística de presión atmosférica estación B18 sobre el glaciar	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1.3-A. Delimitación del glaciar con imagen falso color	8
Figura 3.2-A. Descripción gráfica de la interpolación IDW (Watson, 1985).....	9
Figura 3.2.3-A. Sistema de radar de la marca GSSI con antena de 350 MHz montada en trineo de plástico	11
Figura 3.2.3-B. Radargrama del radar de 350 MHz en una zona de transición entre zona de ablación (B13) y acumulación (B19), donde el manto nival que representa la acumulación de nieve del invierno está delimitado por la línea roja.....	12
Figura 3.5-A. Instalación de GPS base BMCH. 2. Instalación de GPS en balizas.....	15
Figura 4.1-A. Variación areal entre 2021-2022. La imagen de fondo corresponde a una Sentinel 2 del 14 de marzo de 2022.....	17
Figura 4.1-B. Variación areal desde 1976 hasta 2022, con sus respectivos errores	17
Figura 4.2.1-A. Ubicación de balizas en el glaciar sur-oriental del volcán Mocho. La imagen de fondo corresponde a una Sentinel 2 del 25 de marzo de 2021.....	18
Figura 4.2.3-A. Levantamiento de espesor de nieve con RADAR. La imagen de fondo corresponde a una Sentinel 2 del 19 de noviembre de 2021	20
Figura 4.2.3-B. Radargrama del glaciar Mocho, corresponde al recorrido realizado desde B17 a B19. La línea roja corresponde a la interpretación de la superficie de abril de 2021.	21
Figura 4.2.3-C. Acumulación medida con radar e interpolada para la cuenca del glaciar Mocho. La imagen de fondo corresponde a una Sentinel 2 del 19 de noviembre de 2021.	21
Figura 4.2.4-A. Balance glaciológico, glaciar Mocho. 1: Balance de masa glaciológico invernal. 2: Balance de masa glaciológico estival	22
Figura 4.2.4-B. Balance glaciológico anual del glaciar Mocho. La imagen de fondo corresponde a una Sentinel 2 del 14 de marzo de 2022.	23
Figura 4.3-A. Gráfico de dh/dt sin co-registro y con co-registro para el periodo abril 2021 a abril 2022.	24
Figura 4.3-B. Comparación entre GPS cinemático y LiDAR.....	25
Figura 4.3-C. Mapa de tasa de cambio de elevación para el glaciar Mocho (dh). 1: Balance de masa geodésico invernal. 2: Balance de masa geodésico estival.....	26

Figura 4.3-D. Balance de masa geodésico 2021-2022 del glaciar Mocho. 1: Balance geodésico en función de la altura. 2: Perfil hipsométrico del glaciar.....	27
Figura 4.3-E. Balance geodésico anual del glaciar Mocho. La imagen de fondo corresponde a una Sentinel 2 del 25 de marzo de 2021	28
Figura 4.4.1-A. Comparación del balance glaciológico y geodésico, periodo invernal, periodo estival y periodo anual	30
Figura 4.4.1-B. Comparación del balance de masa del glaciar Mocho temporada 2021-2022. 1: Balance de masa glaciológico. 2: Balance de masa geodésico	31
Figura 4.5-A. Desplazamiento horizontal de las balizas observado entre noviembre de 2021 y abril 2022. La imagen de fondo corresponde a una Sentinel 2 del 14 de marzo de 2022.	34
Figura 5.4.1-A. Ubicación del área de trabajo	39
Figura A I-A. Levantamiento con GPR de 350 MHz	47
Figura A I-B. Estación Meteorológica Automática sobre glaciar.....	48
Figura A I-C. Instalación de balizas con taladro Heucke	51
Figura A I-D. Levantamiento con receptor GNSS doble frecuencia	52
Figura A I-E. Medición de densidad de nieve en pozo.....	52
Figura A I-F. Medición de altura de baliza.....	53
Figura A I-G. Instrumento LiDAR terrestre	56
Figura A III-A. Temperatura a nivel diario, registrando máximo, mínimo y promedio	61
Figura A III-B. humedad relativa a nivel diario, registrando máximo, mínimo y promedio.	62
Figura A III-C. Radiación de onda corta promedio a nivel diario	63
Figura A III-D. Velocidad y dirección del viento.....	64
Figura A III-E. Presión atmosférica promedio a nivel diario.....	65

1. INTRODUCCIÓN

La Dirección General de Aguas (DGA) requiere desarrollar el estudio denominado "APOYO PARA EL MONITOREO DE DETALLE INTENSIVO DEL GLACIAR SUR-ORIENTAL DEL VOLCÁN MOCHO, REGIÓN DE LOS RÍOS, MACROZONA SUR, 2021-2022", 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 Unidad de Glaciares y nieves (UGN).

El glaciar sur-oriental del volcán Mocho, también denominado "Glaciar Mocho", se encuentra ubicado sobre el complejo volcánico Mocho-Choshuenco en la zona glaciológica sur del país. En el Banco Nacional de Aguas el Glaciar Mocho está identificado con el código CL110301001A, dentro de la cuenca del Rio Bueno, región de Los Ríos.

Este glaciar posee un historial de monitoreo desde el año 2003, iniciado por el Centro de Estudios Científicos (CECs) y consecutivamente propiciado por la Universidad Austral de Chile (UACH). Dentro de los estudios realizados anteriormente, se ha reportado información sobre el balance de masa glaciológico, así como también de sus variaciones frontales y areales, velocidades y espesores de hielo, en publicaciones científicas, como en Rivera, et al (2005) (2006) o Schaefer, et al (2017), y estudios encargados por la DGA (S.I.T. N°261, 338, 327, 479). La DGA está patrocinando el estudio, desde la temporada estival 2020-2021 a la fecha, en el cual se ha generado nueva información respecto de la respuesta del glaciar frente a las variables ambientales, por medio de herramientas tecnológicas, como LIDAR, GNSS, imágenes de satélite y Sistemas de Información Geográfica (SIG). Los resultados reflejan la pérdida de masa y retroceso del glaciar durante el siglo XXI (DGA, 2021), observándose un derretimiento acelerado en la temporada 2021-2022, debido principalmente al déficit de precipitaciones en este período.

En el presente informe se muestra la metodología y descripción detallada de los trabajos realizados, parte de ellos concretados en 5 campañas a terreno, además de los resultados obtenidos en este estudio.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo General

Apoyar con el monitoreo de detalle intensivo (nivel 2) del glaciar sur-oriental del volcán Mocho, código Banco Nacional de Aguas (BNA) CL110301001, cuenca del Río Bueno, región de Los Ríos, ubicado en la Macrozona Sur dentro de la zonificación glaciológica definida para nuestro país.

2.2. Objetivos Específicos

1. Proponer un mínimo de 5 y un máximo de 10 sitios para ubicar balizas durante el periodo estival para medir ablación.
2. Realizar una campaña al glaciar sur-oriental del volcán Mocho a principios de la primavera de 2021, instalando una baliza en cada sitio propuesto, en total 5 a 10 balizas, enterradas al menos 10 metros de profundidad, cuyos sitios deben ser previamente aprobados por el Inspector Fiscal, midiendo las coordenadas con receptor GNSS doble frecuencia en modo diferencial y registrando la altura de cada baliza.
3. Apoyar logísticamente un levantamiento del glaciar sur-oriental del volcán Mocho con LiDAR terrestre que será realizado por un funcionario de la UGN mediante un instrumento de la UGN, al principio de la primavera de 2021. Los gastos asociados al traslado de dicho funcionario DGA y su instrumento hasta la zona (específicamente hasta donde se pueda llegar en vehículo) serán costeados por la DGA.
4. Medir, durante la campaña de principios de la primavera 2021, la nieve acumulada a fines de invierno mediante un radar (GPR) de 350 MHz.
5. Instalar una estación meteorológica automática en la superficie del glaciar, durante la temporada de ablación 2021-2022.

6. Medir durante el mes de enero o febrero de 2022, y luego nuevamente en marzo o abril de 2022, en total en 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.
7. Apoyar logísticamente un levantamiento del glaciar sur-oriental del volcán Mocho con LiDAR terrestre que será realizado por un funcionario de la UGN mediante un instrumento de la UGN, en marzo o abril 2022, al final del verano. Los gastos asociados al traslado de dicho funcionario DGA y su instrumento hasta la zona (específicamente hasta donde se pueda llegar en vehículo) serán costeados por la DGA.
8. Confeccionar un balance de masa geodésico del glaciar sur-oriental del volcán Mocho, tanto invernal (invierno 2021) como estival (verano 2021-2022), en base a levantamientos LiDAR terrestres del fin de verano 2020-2021, fin del invierno 2021 y fin del 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.
9. Confeccionar un balance de masa glaciológico superficial invernal 2021 de parte del glaciar sur-oriental del volcán Mocho, en base al levantamiento con radar, y del periodo estival 2021-2022, del sector donde se instalaron las balizas, y comparar dichos balances de masa glaciológicos superficiales con el balance de masa geodésico correspondiente al mismo sector y al mismo periodo.
10. Determinar la variación areal del glaciar sur-oriental del volcán Mocho, 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 deberá autorizar el Inspector Fiscal.

11. 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 imágenes satelitales, fotos aéreas, 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 <https://snia.mop.gob.cl/sad/OTR5831.pdf>.

3. METODOLOGÍA

Para desarrollar los objetivos propuestos para el estudio del glaciar Mocho, se requiere de la realización de distintas actividades (Tabla 3-A), tales como, mediciones con GPS, LiDAR terrestre, RADAR, medición de balizas, densidad de nieve y la instalación de una estación meteorológica automática sobre el glaciar, que se llevaron a cabo durante 5 campañas de terreno en el glaciar Mocho. Con la información recabada se ejecutaron los demás objetivos planteados, donde se procedió a sistematizar, procesar y analizar los datos por medio de Sistemas de Información Geográfica, aplicando distintas metodologías de cálculo que se describen en este apartado.

A continuación, se presenta la Carta Gantt (Tabla 3-A) donde se indica la planificación y ejecución del estudio. Esta contempla la programación de la etapa inicial durante la primavera 2021, donde se realizaron mediciones al final de la temporada de acumulación y posteriormente en la etapa final, con las mediciones de ablación, GPS y LiDAR.

Tabla 3-A. Carta Gantt.

OBJETIVOS	Agosto	Octubre	Noviembre	Diciembre	Febrero	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto
Inf. Inicial	■									
1										
2			■							
3										
4		■								
5										
6				■						
7					■					
8						■				
9							■			
10								■		
Inf. Avance									■	
11										■

Fuente: Elaboración propia.

3.1. Variación Areal 2021 al 2022

Las variaciones areales se determinaron mediante el análisis de imágenes satelitales Sentinel 2 (Tabla 3.1-A) de fines de verano del 2021 y 2022, buscando aquellas que, en lo posible, coincidan con el término del año hidrológico y que también se observe una mínima presencia de nieve y nubosidad, para evitar errores en la interpretación debido a esta

condición. La delimitación del glaciar se realizó con software de sistema de información geográfica mediante la interpretación manual del contorno del glaciar para obtener una mejor identificación de la extensión de este.

Tabla 3.1-A. Características de las imágenes Sentinel.

Plataforma	Sensor	Resolución espectral (Bandas)	Resolución espacial (metros)	Resolución radiométrica (Bits)
Sentinel	2 A	12	10-60	12
Sentinel	2 B	12	10-60	12

Fuente: USGS.

3.1.1. Corrección Atmosférica

Se realizó un tratamiento digital a las imágenes, utilizando el método de sustracción de objetos oscuros (DOS) también conocido como método de Chávez, esta técnica sirve para eliminar el efecto de la dispersión de la radiación electromagnética originada por las gases y partículas atmosférica (Delúquez, 2008) "este método recurre al ND mínimo de cada banda como medida de la radiancia debida a la dispersión atmosférica, mientras que la transmisividad atmosférica para el flujo descendente se extrapola de experimentos físicos llevados a cabo sobre atmósferas reales sin cobertura nubosa" (Chuvienco, Salas y Riaño, 2000), es decir, la corrección fue realizada para cada banda en todos los pixeles de la escena, efectuando una diferencia entre el valor teórico y el almacenado por el sensor.

Los valores estimados que sirven para calibrar la imagen se obtienen en la ecuación:

$$\rho\lambda = \frac{\pi * L\lambda * d^2}{ESUN_{\lambda} * \cos(\theta_s)}$$

Dónde:

$\rho\lambda$ = Reflectancia planetaria TOA

π = Constante matemática igual a ~ 3,14159 (sin unidad)

$L\lambda$ = Resplandor espectral en la apertura del sensor (Watts/m²*srad* μ m)

d = Distancia Tierra-Sol (unidades astronómicas)

$ESUN_{\lambda}$ = Irradiancia solar exoatmosférica media (Watts/m²μm)

θ_s = ángulo cenital solar (grados)

3.1.2. Combinación de Colores

Tabla 3.1.2-A. Combinación de bandas utilizadas en Imágenes Sentinel.

Color	Nº Banda	Banda	Rango Espectral (μm)	Resolución (m)
Red	5	NIR	0,69-0,71	10
Green	4	RED	0,65-0,68	10
Blue	3	GREEN	0,54-0,57	10

Fuente: USGS.

Las imágenes satelitales son registradas simultáneamente en varias regiones del espectro electromagnético o bandas, estas pueden ser estudiadas individualmente representadas con una escala de grises o en imágenes coloreadas mediante la combinación de bandas espectrales, estas últimas se generan según el color RGB (rojo, verde y azul) (Chuvieco, 2014). Una combinación de las bandas NIR, RED y GREEN fue utilizada con las imágenes Sentinel, la que corresponde a una composición en falso color, con la cual se obtiene un mejor realce de la superficie de hielo (Tabla 3.1.2-A).

3.1.3. Delimitación del Glaciar Mocho

La delimitación del glaciar se realizó mediante una digitalización manual, para ello se compone la vista de la imagen en la combinación de bandas falso color mencionado en la sección anterior, en esta tarea se utilizó el software QGIS 3.22 (Figura 3.1.3-A).

La determinación del error de interpretación del glaciar se realizó utilizando la resolución espacial de cada imagen, ponderado por la longitud de los bordes del cuerpo de hielo delimitado en cada caso, (Rivera et al., 2006; Williams et al., 1997).

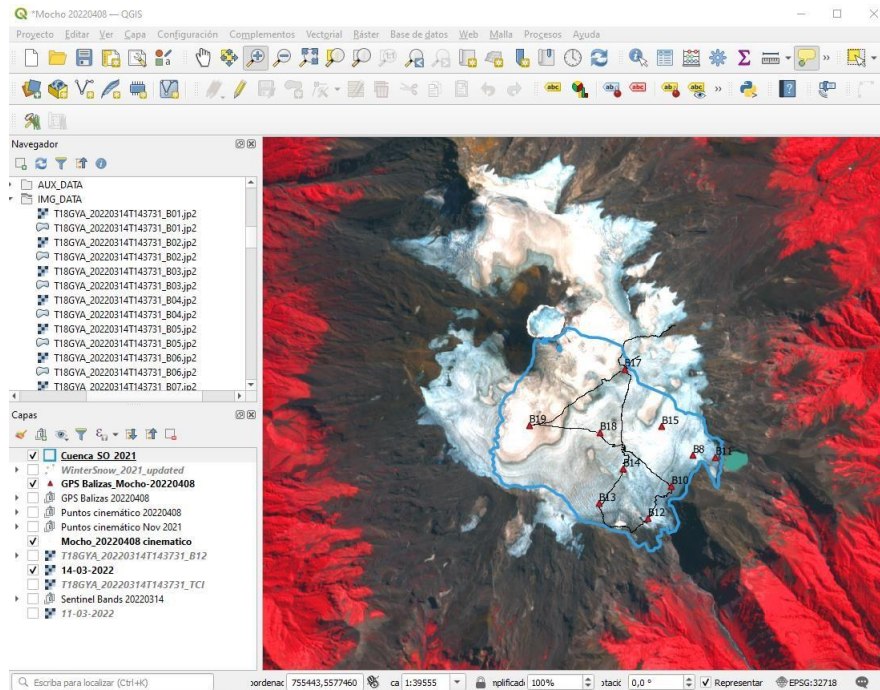


Figura 3.1.3-A. Delimitación del glaciar con imagen falso color.

Una vez delimitado el glaciar se procedió a calcular su área y perímetro, también se realizó el cálculo del error de interpretación para obtener la incertidumbre respecto de la superficie cubierta por el glaciar en cada época basado en la siguiente formula:

$$Error = \frac{Perimetro (km)}{\sqrt{2}} * Resolucion(km)$$

3.2. Balance de Masa Glaciológico Temporada 2021-2022

Se estimó el balance de masa glaciológico, también conocido como balance de masa de superficie, de parte del glaciar sur-oriental del volcán Mocho para la temporada 2021-2022, utilizando las mediciones de altura de balizas de ablación y los datos del levantamiento de espesor de nieve de fines del invierno de 2021, con un sistema RADAR de 350 MHz de la compañía de instrumentos de geofísica GSSI, con esta información se calculó el balance de masa de acumulación o invernal, el balance de masa de ablación o estival y el balance de

masa neto de la temporada 2021-2022, para toda la superficie del glaciar utilizando el método de interpolación IDW (Inverse Distance Weighted).

El método IDW estima los valores de las zonas faltantes mediante una interpolación, a partir de las zonas conocidas (Figura 3.2-A), los valores cercanos a las zonas conocidas se asumen como valores más similares. La interpolación IDW se basa en la siguiente ecuación:

$$z_p = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{z_i}{(d_i)^\alpha} \right)}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{(d_i)^\alpha} \right)}$$

Donde:

z_p = Valor estimado en el punto p

n = Número de puntos usados en la interpolación (Total de balizas)

z_i = Valor conocido (BM)

d_i = Distancia desde el punto conocido i al punto a estimar p

α = Potencia del inverso de la distancia (=2)

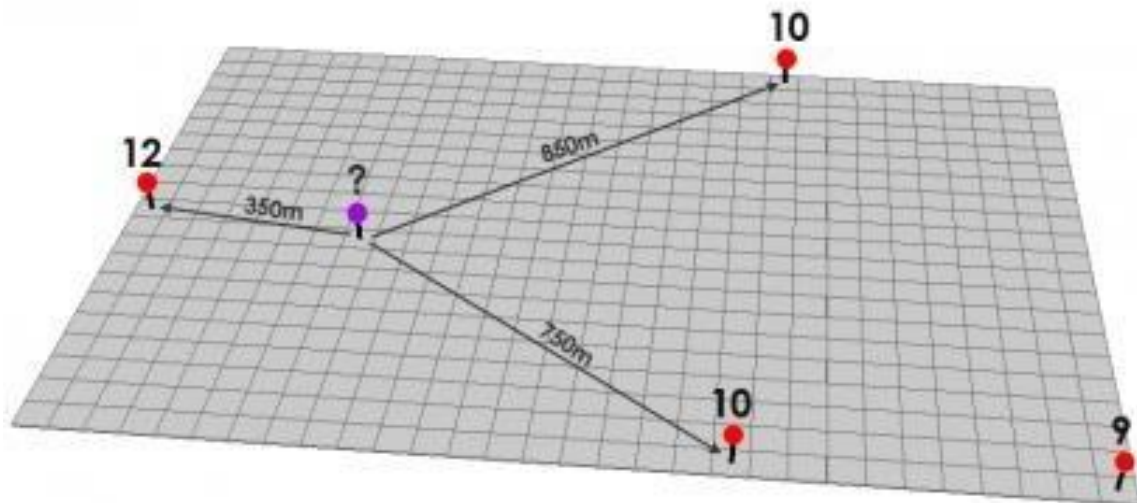


Figura 3.2-A. Descripción gráfica de la interpolación IDW (Watson, 1985).

3.2.1. Sitios de Medición de Ablación

Se realizó una propuesta de 10 sitios para la instalación de balizas de ablación, en cada uno de ellos se observó la posición geográfica, para posteriormente ubicar dichas coordenadas in situ con GPS navegador. El criterio de selección de los sitios para la instalación de balizas corresponde a la continuidad del estudio glaciológico efectuado anteriormente.

3.2.2. Medición de Ablación

Se registró la altura de cada baliza medida con huincha métrica en cada una de las visitas al glaciar (Figura A I-F), con estas mediciones se calculó la ablación de nieve y hielo utilizando la siguiente ecuación:

$$BM = (ha - hv)\rho$$

Dónde:

BM: Balance de masa (m eq.a.)

ha: altura de la baliza en la época anterior (m)

hv: altura de la baliza actual (m)

ρ : Densidad de la nieve o hielo (kg/m^3)

3.2.3. Medición de Espesor de Nieve con Ground Penetrating RADAR (GPR)

En la campaña N°1 se midió la nieve acumulada en la zona de ablación durante el invierno (2021) utilizando un GPR SIR4000 y antenas de 350 MHz (ambos GSSI Inc.) (Figura 3.2.3-A). El recorrido se hizo en moto de nieve utilizando las balizas como referencia para orientar el trayecto (velocidad promedio de desplazamiento 3,2 m/s), con la antena TxRx instalada en un pequeño trineo remolcado con la moto.

Las antenas TxRx están diseñadas para emitir un haz de ondas direccionales bajo la superficie registrando el retorno de éstas desde las interfases o cambios en las propiedades

del medio de propagación (nieve, neviza, hielo, roca, etc.). El tiempo transcurrido entre la emisión y el retorno de la onda permite estimar la profundidad del reflector. Asumiendo una velocidad de propagación constante de 0,21 m/ns, correspondiente a una estimación de velocidad según la densidad promedio de la nieve acumulada durante el invierno ($0,517 \text{ kg/m}^3$), se obtiene el espesor de la capa de nieve acumulada durante el invierno pasado en metros. Para medir el espesor hay que identificar el primer reflector observado en los radargramas (Figura 3.2.3-B), lo que representa la superficie del glaciar al final del verano del año anterior.

Durante el levantamiento se registraron una serie de archivos. Los datos fueron procesados e interpretados manualmente en un software comercial (ReflexW Sandmeier). El procesamiento estándar incluye: corrección del inicio de la señal, filtros pasa banda, corrección según velocidad de desplazamiento, remoción de ruido y ajustes de ganancia.



Figura 3.2.3-A. Sistema de radar de la marca GSSI con antena de 350 MHz montada en trineo de plástico.

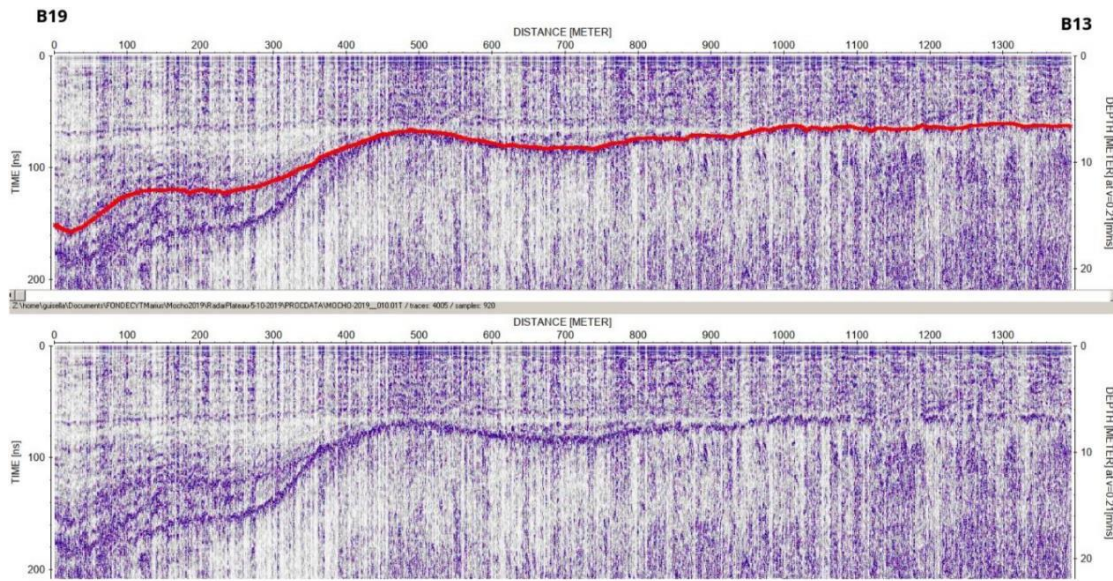


Figura 3.2.3-B. Radargrama del radar de 350 MHz en una zona de transición entre zona de ablación (B13) y acumulación (B19), donde el manto nival que representa la acumulación de nieve del invierno está delimitado por la línea roja.

3.2.4. Cálculo de la Incertidumbre del Balance de Masa Glaciológico

Debido a la incertidumbre de los datos medidos en terreno, se calcula el error mediante la fórmula propuesta por Schaefer et al., (2017), esta incertidumbre asume un 10% de error en la medición de campo, este método se basa en la fórmula de Gauss sobre la propagación del error. Schaefer et al., (2017) determina la siguiente ecuación para las mediciones de balizas individual:

$$\sigma_a = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\sigma_i)^2}$$

Donde:

- σ_i : Incertidumbre de los valores obtenidos en i veces visitados
- n : Número de visitas por temporada (3-4 veces según estaca)

Para el balance de masa anual σ_a^G obtenido por la interpolación de las estacas, se estima mediante la siguiente ecuación:

$$\sigma_a^G = \frac{1}{11} \sqrt{\sum_{i=1}^{11} (\sigma^i)^2}$$

Donde:

σ_a^G : Incertidumbre anual del balance de masa obtenido de las 10 mediciones en terreno

3.3. Balance de Masa Geodésico

Se elaboró un balance de masa geodésico del glaciar sur-oriental del volcán Mocho en base a la información LiDAR terrestre, con los datos proporcionados por la UGN de fin del verano 2020-2021, fin del invierno 2021 y fin del verano 2021-2022.

El balance geodésico determina los cambios del volumen a partir de un cambio en la elevación del glaciar en función del tiempo (dt/dh) (Zemp et al., 2013), Fischer el año 2016 determina la siguiente ecuación para calcular la variación de la masa en función al tiempo:

$$B_{geo} = \frac{\Delta V f_{\Delta v}}{A \rho_w} \text{ (m eq. a.)}$$

Donde:

ΔV = Variación altimétrica del glaciar

$f_{\Delta v}$ = Densidad de agua 1000 (kg/m³)

ρ_w = Densidad de hielo definida en 850 (kg/m³) (Huss, 2013)

A = Área del glaciar

Para calcular ΔV que se define como el cambio de volumen que se obtiene entre la diferencia de la elevación en función al tiempo se establece con la siguiente formula:

$$\Delta V = r^2 \sum_{k=1}^K \Delta h_k \text{ (m}^3\text{)}$$

Donde:

K =: Número de pixeles que abarca el área glaciar

Δh_k : Diferencia de elevación entre dos pixeles k y r

Debido a la incertidumbre en las variaciones de elevación de un terreno, se calcula el error de inexactitud (Farias-Barahona et al., 2020) mediante la siguiente fórmula:

$$dM = M \sqrt{\left[\frac{\delta_{dh}}{dh_{Total}} \right]^2 + \left[\frac{\delta_A}{A} \right]^2 + \left[\frac{\delta_\rho}{\rho} \right]^2}$$

Donde:

dM = Error de incertidumbre en el balance geodésico

$\left[\frac{\delta_{dh}}{dh_{Total}} \right]^2$ = Error de incertidumbre en las variaciones de altura

$\left[\frac{\delta_A}{A} \right]^2$ = Error de incertidumbre del área glaciar

$\left[\frac{\delta_\rho}{\rho} \right]^2$ = Error de incertidumbre de la densidad de hielo

3.4. Comparación de Resultados del Balance de Masa

Los balances se compararon mediante la fórmula de error cuadrático medio (RMSE), para determinar el grado de diferencia entre los diversos métodos empleados (Wise, 2011) el RMSE se basa en la siguiente fórmula:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta_i - \hat{\Delta})^2}$$

Δ_i : Diferencia de valores obtenidos entre los diferentes métodos

n : Número total de la muestra

3.5. Adquisición y Procesamiento de Datos GNSS

Una vez realizada la instalación de balizas de ablación, en cada uno de los sitios propuestos, se determinó la posición geográfica por medio de un sistema GPS GNSS con corrección

diferencial, que fue calculada con el software Emlid Studio a través del procesamiento de los datos registrados por el sistema GNSS. El procedimiento consistió en la instalación de un receptor GPS base en un punto fijo de coordenadas conocidas en la base del volcán mocho (BMCH) y un receptor GPS móvil, el cual es utilizado para medir la posición en cada una de las balizas (Figura 3.5-A), esta operación fue efectuada en cada campaña desde la instalación de las balizas de ablación, con ello es posible conocer la posición de las balizas durante la temporada de ablación, lo que nos permite estimar las velocidades superficiales del glaciar.



Figura 3.5-A. 1. Instalación de GPS base BMCH. 2. Instalación de GPS en balizas.

4. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en el estudio, dando cumplimiento a los objetivos específicos.

4.1. Variación Areal 2021 al 2022

Para el año 2021 el glaciar presentaba una superficie de $5,10 \pm 0,12$ (DGA, 2021), mientras que para el año 2022 la superficie delimitada fue de $5,00 \pm 0,12$ (Tabla 4.1-A).

Tabla 4.1-A. Resumen de las variaciones areales del glaciar.

Año	Resolución (m)	Área (km ²)	Perímetro (km)	Error (km ²)	Área total (km ²)
2021	15	5,10	11,45	0,12	$5,10 \pm 0,12$
2022	15	5,00	11,55	0,12	$5,00 \pm 0,12$

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4.1-A se muestra los polígonos correspondientes a la delimitación del año 2021 en rojo y del fin del año hidrológico 2021-2022, con una línea azul. La disminución de la superficie se aprecia principalmente hacia los frentes y zona baja del glaciar, con una diferencia de $0,1 \text{ km}^2$ menos que el periodo anterior, superando la tasa de retroceso promedio anual del glaciar de $-0,023 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$, como se puede observar en la figura 4.1-B.

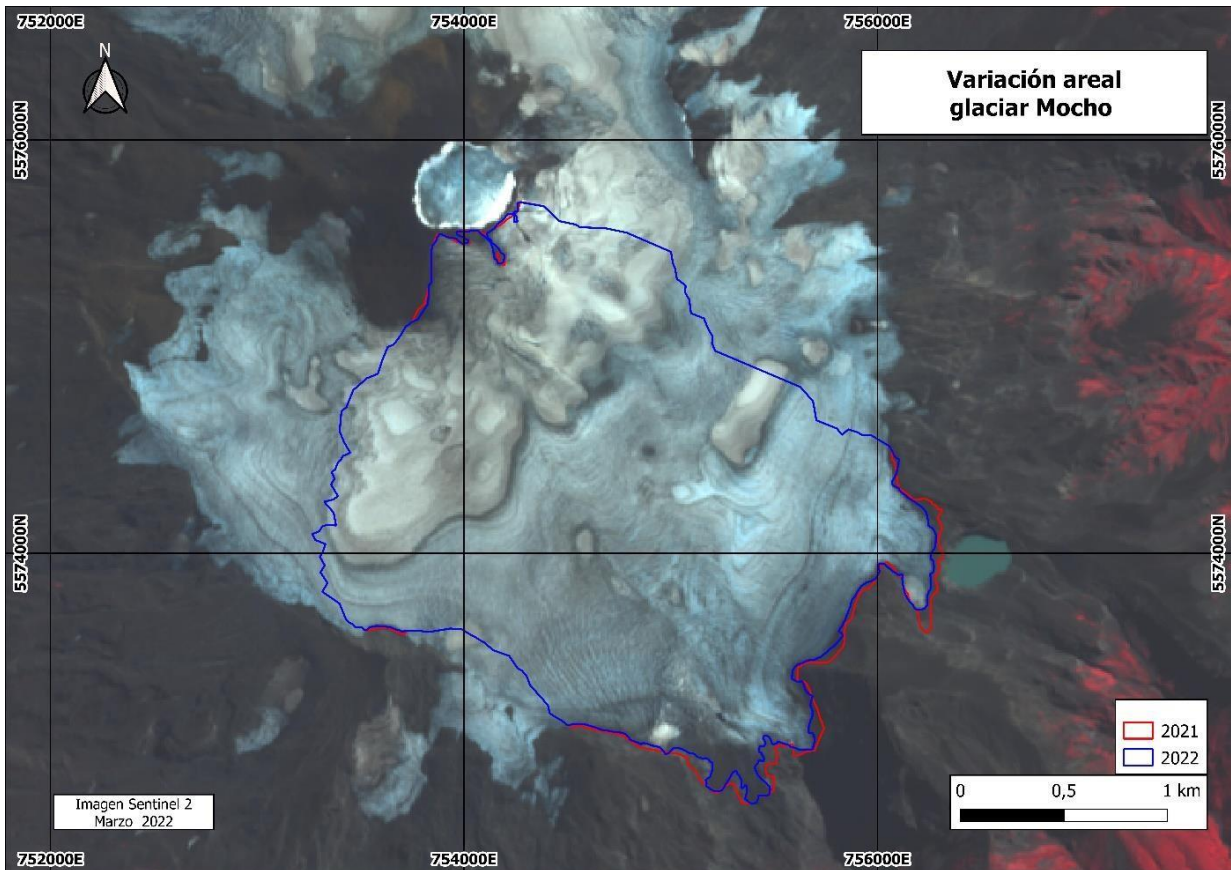


Figura 4.1-A. Variación areal entre 2021-2022. La imagen de fondo corresponde a una Sentinel 2 del 14 de marzo de 2022.

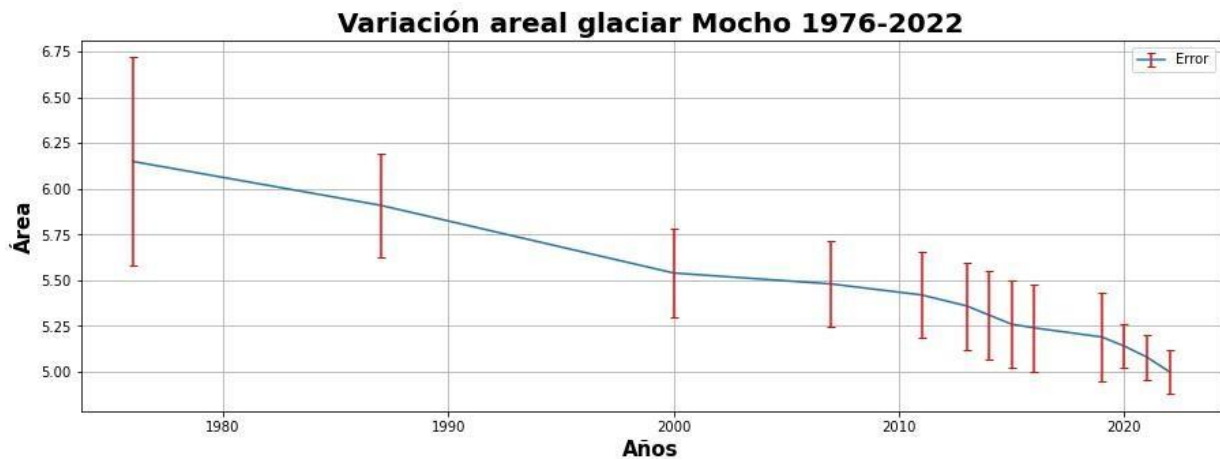


Figura 4.1-B. Variación areal desde 1976 hasta 2022, con sus respectivos errores.

4.2. Balance de Masa Glaciológico Temporada 2021-2022

4.2.1. Sitios de Medición de Ablación

Los sitios propuestos para Instalación de balizas de ablación se muestran en la figura 4.2.1-A. La denominación de cada sitio proviene del programa de monitoreo iniciado por el CECs en el año 2003, los cuales se mantienen vigentes a la fecha por el trabajo del equipo científico de la UACH.

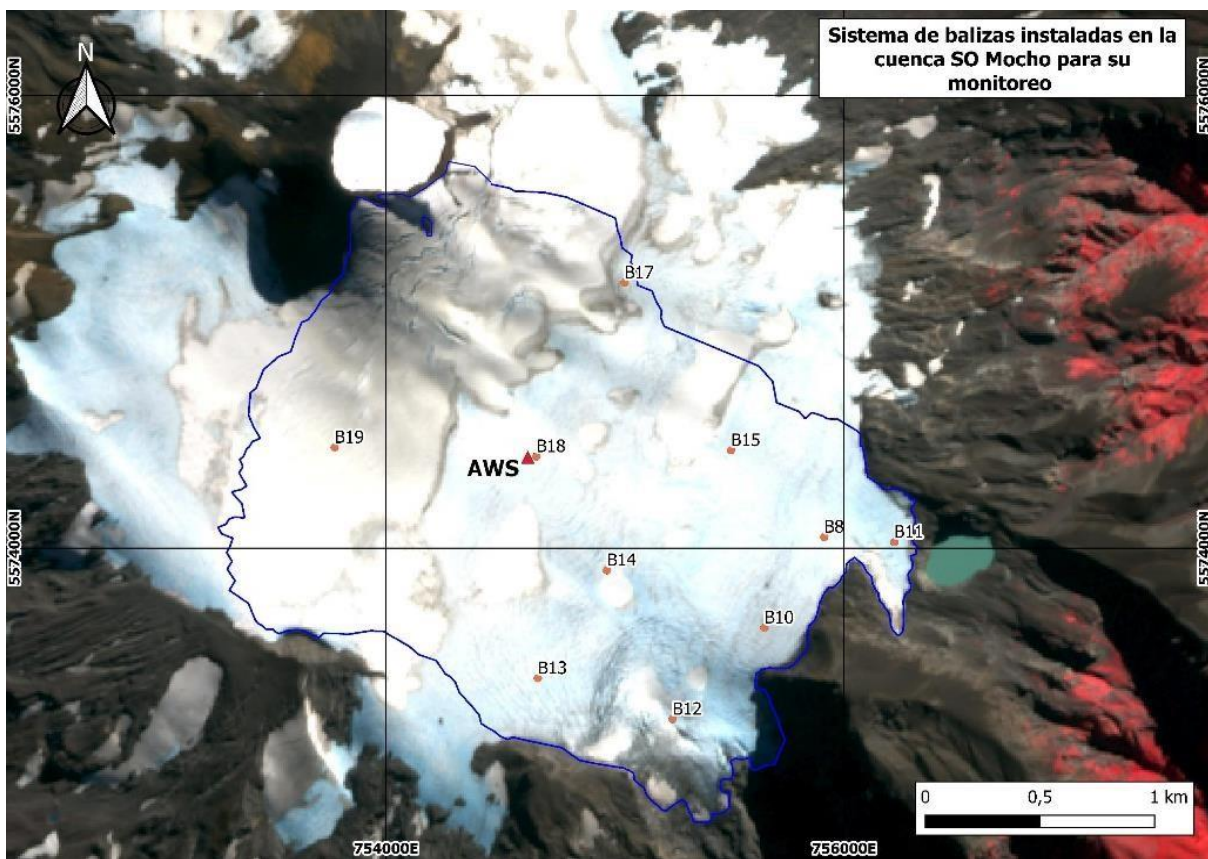


Figura 4.2.1-A. Ubicación de balizas en el glaciar sur-oriental del volcán Mocho. La imagen de fondo corresponde a una Sentinel 2 del 25 de marzo de 2021.

4.2.2. Medición de Ablación

Las mediciones en balizas se iniciaron el 4 de octubre de 2021, por lo que existe un pequeño desfase con el inicio de la época de ablación de la temporada 2021-2022. Un resumen con los resultados del balance de masa en balizas de ablación se muestra en la tabla 4.2.2-A.

Tabla 4.2.2-A. Balance de masa en balizas, temporada estival 2021-2022.

Baliza	Balance de masa m eq.a.					Incertidumbre
	Noviembre	Diciembre	Febrero	Abril	Total	
B03		-1,07	-2,71			0,29
B08	-0,11	-1,33	-4,15	-1,25	-6,84	0,45
B10	-0,15	-1,55	-4,37	-1,64	-7,71	0,49
B11		-1,34	-4,10	-1,73		0,46
B12	-0,61	-1,78	-4,68	-1,73	-8,80	0,53
B13		-1,28	-3,63			0,38
B14	0,20	-1,18	-3,14	-1,42	-5,54	0,36
B15	0,14	-1,18	-3,53	-1,05	-5,62	0,38
B17	0,12	-1,07	-3,03			0,32
B18	0,08	-1,12	-3,02	-1,56	-5,62	0,35
B19	0,30	-1,05	-2,30	-0,78	-3,83	0,26
D. nv. (kg/m ³)	582	582	593	588	Total	0,39

Fuente: Elaboración propia. (D. nv.: densidad de nieve)

4.2.3. Medición de Espesor de Nieve con RADAR

El levantamiento de espesor de nieve con RADAR se muestra en la figura 4.2.3-A, donde se puede apreciar el trayecto realizado. La distancia recorrida fue de 7,3 km. El espesor mínimo de acumulación registrado fue de 3,1 m en el sector Este del glaciar (B8) y el máximo es de 7,18 m, entre las balizas B15 y B17.

En la figura 4.2.3-B se muestra un radargrama obtenido durante el recorrido entre B17 y B19, en este se puede ver un aumento de la profundidad de nieve hacia el sector de la baliza B19.

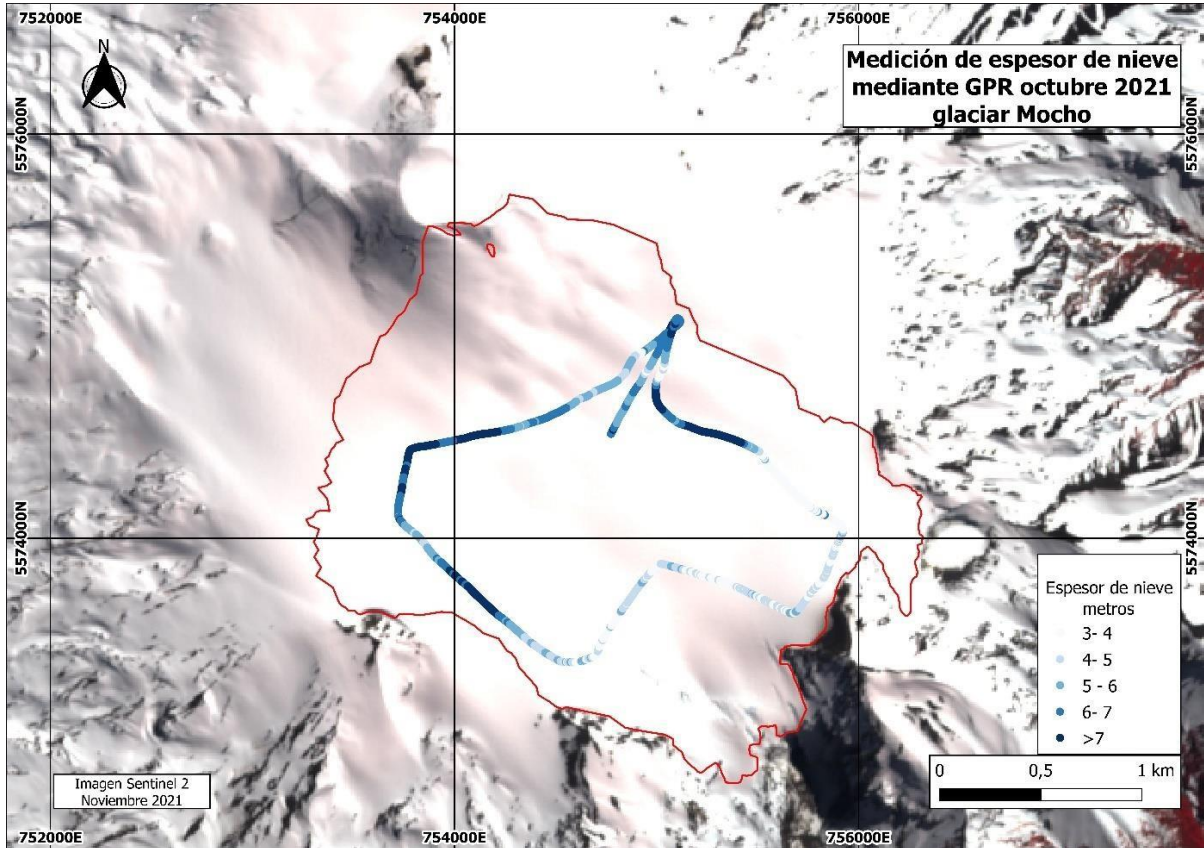


Figura 4.2.3-A. Levantamiento de espesor de nieve con RADAR. La imagen de fondo corresponde a una Sentinel 2 del 19 de noviembre de 2021.

Se realizó una interpolación y extrapolación de los datos con el método Inverse Distance Weighted (IDW) para estimar la distribución de la nieve en el glaciar (Figura 4.2.3-C), utilizando todos los datos registrados por el GPR (Figura 4.2.3-A), el espesor promedio de nieve acumulado en el glaciar fue de $5,04 \pm 0,50$ m.

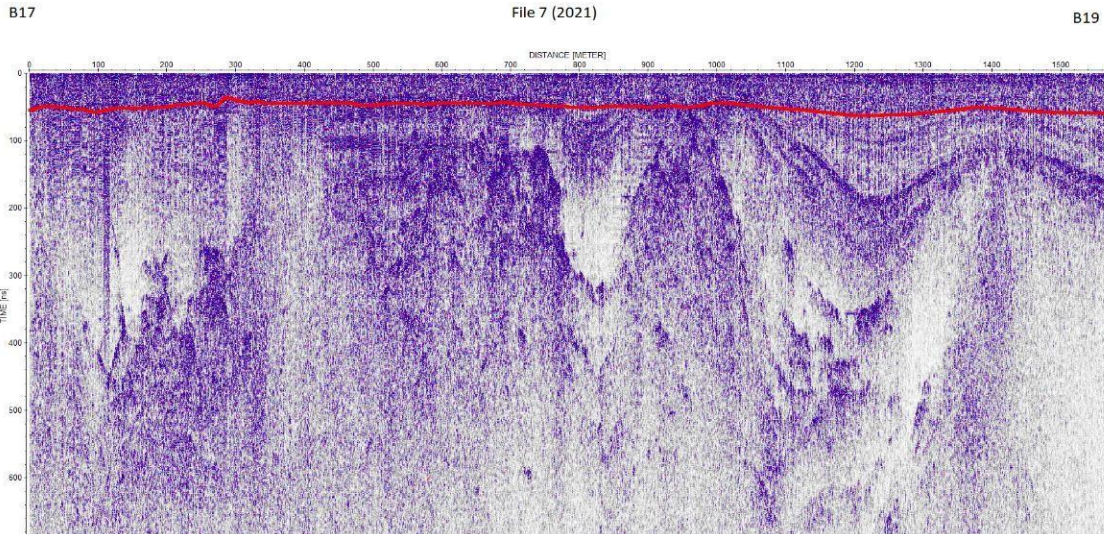


Figura 4.2.3-B. Radargrama del glaciar Mocho, corresponde al recorrido realizado desde B17 a B19. La línea roja corresponde a la interpretación de la superficie de abril de 2021.

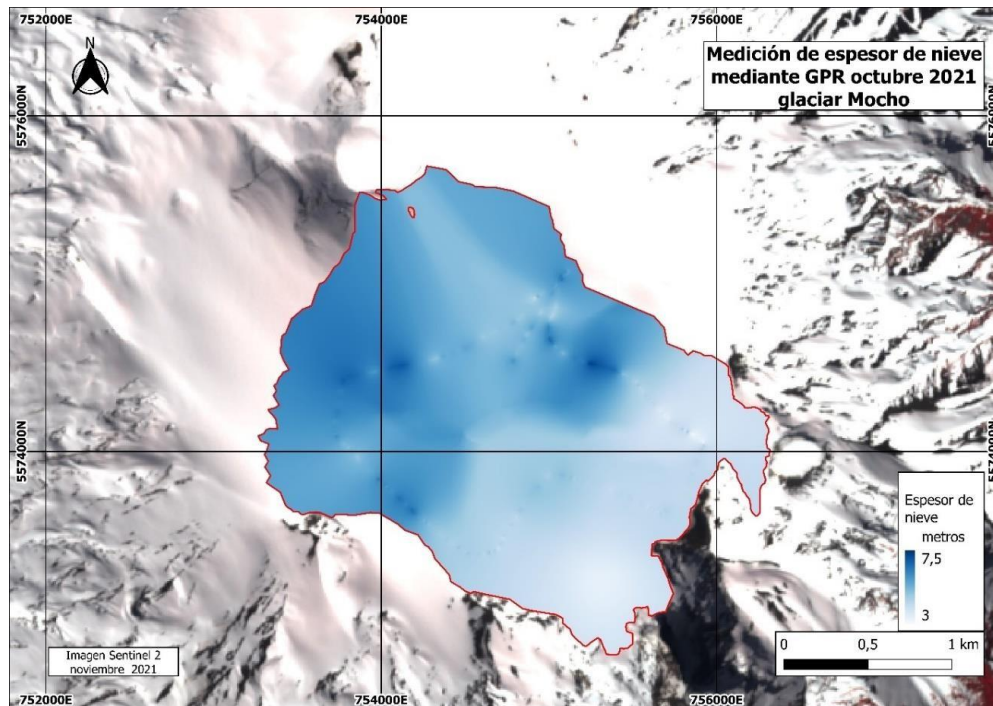


Figura 4.2.3-C. Acumulación medida con radar e interpolada para la cuenca del glaciar Mocho. La imagen de fondo corresponde a una Sentinel 2 del 19 de noviembre de 2021.

4.2.4. Balance de masa glaciológico glaciar Mocho

El balance de masa glaciológico del glaciar Mocho fue de $-2,56 \pm 0,24$ m eq.a. (Tabla 4.2.4-A) en el año hidrológico 2021-2022.

Tabla 4.2.4-A. Valores de balances de masa glaciológico.

Periodo	Mínimo (m eq.a.)	Máximo (m eq.a.)	Promedio (m eq.a.)	Incertidumbre (m eq.a.)
Acumulación	1,82	4,16	2,93	$\pm 0,29$
Ablación	-8,79	-3,78	-5,49	$\pm 0,40$
Anual	-6,23	-0,15	-2,56	$\pm 0,24$

Fuente: Elaboración propia.

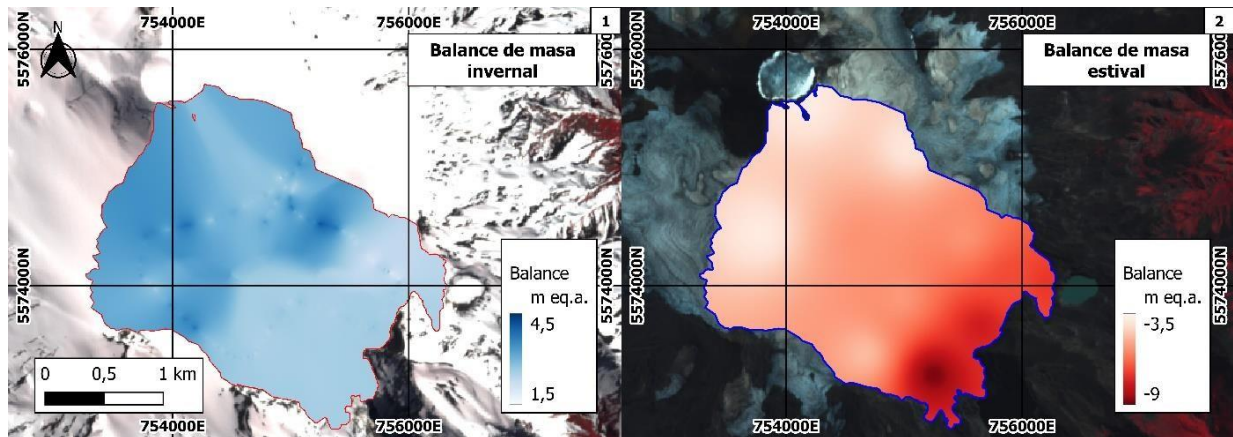


Figura 4.2.4-A. Balance glaciológico, glaciar Mocho. 1: Balance de masa glaciológico invernal. 2: Balance de masa glaciológico estival.

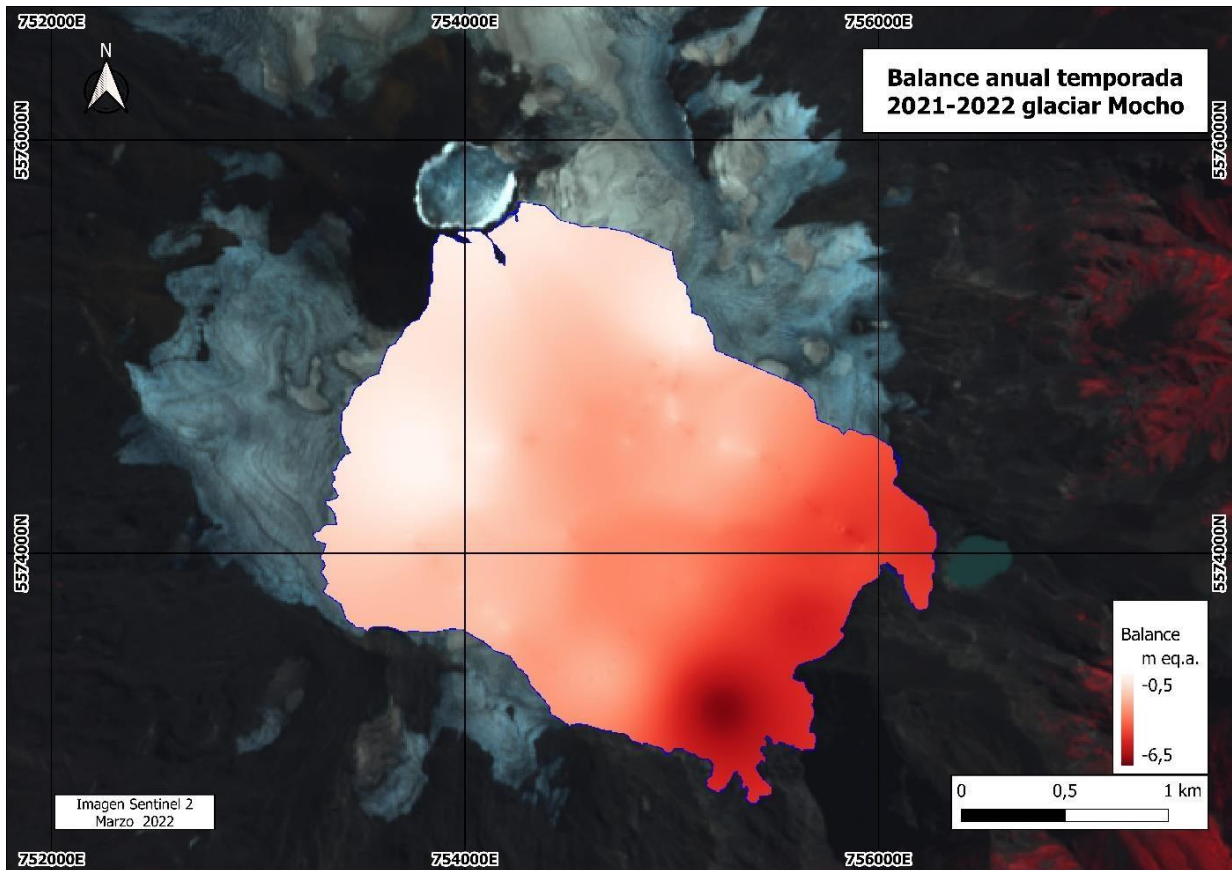


Figura 4.2.4-B. Balance glaciológico anual del glaciar Mocho. La imagen de fondo corresponde a una Sentinel 2 del 14 de marzo de 2022.

4.3. Balance de Masa Geodésico

Para calcular el balance de masa geodésico para la temporada 2021-2022, con los datos LiDAR proporcionados por la UGN, se buscaron zonas de control fuera del área glaciar para hacer el co-registro de los DEMs, con el fin de disminuir los errores verticales y horizontales estas zonas deberían presentar mínimos cambios en el tiempo, por lo que se buscaron áreas sin presencia de hielo/nieve con pendiente inferior a los 10°. El balance geodésico anual (abril 2021-abril 2022) muestra un error de co-registro de 0,5 m en la componente vertical (Figura 4.3-A.).

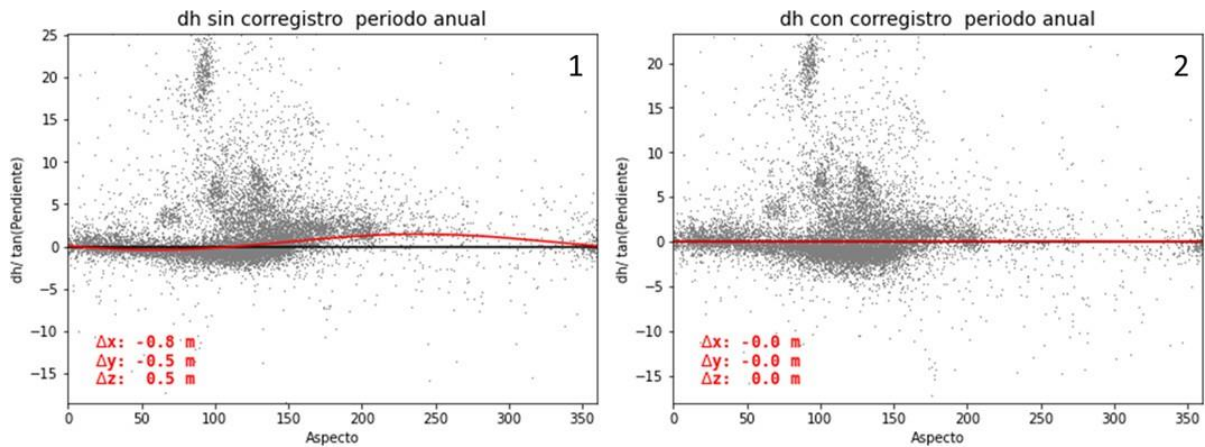


Figura 4.3-A. Gráfico de dh/dt sin co-registro (1) y con co-registro (2) para el periodo abril 2021 a abril 2022.

En el caso de los balances de masa geodésicos invernal (abril 2021-noviembre 2021) y estival (noviembre 2021-abril 2022) no se realizó el co-registro, debido a que a la fecha del levantamiento LiDAR las áreas de control estaban cubiertas por una capa de nieve, lo que impide hacer esta comparación. Durante la temporada de acumulación el error vertical entre ambos LiDAR es de 1,5 m, mientras que para la temporada de ablación este valor fue de 2,4 m, medidos en las áreas de control. Para tener mayor certeza del error vertical atribuible a los datos LiDAR, se realizó la comparación de estos con datos GPS cinemáticos levantados en la misma fecha que el LiDAR. Los datos evaluados corresponden a puntos GPS medidos sobre el glaciar, la diferencia entre ellos es en promedio menor a 1 m como se puede apreciar en la tabla 4.3-A, en noviembre los datos GPS están 14 cm por debajo del registro LiDAR, probablemente esto se debe a la regularidad que presenta el terreno nevado, por otra parte en el mes de abril aumenta esta diferencia, con 49 y 64 cm por debajo del LiDAR, debido a que el glaciar presenta grietas y la travesía por estas puede interferir en el registro cinemático.

Tabla 4.3-A. Diferencias entre GPS cinemático y LiDAR.

Levantamiento	Promedio (m)	RMSE	Mínimo (m)	Máximo (m)	N
Abril 2021	-0,49	±0,56	-1,90	1,35	13.109
Noviembre 2021	-0,14	±0,30	-1,01	0,79	4.560
Abril 2022	-0,64	±0,58	-1,88	1,40	10.079

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4.3-B se muestra una comparación gráfica de los datos evaluados. El gráfico de dispersión muestra que existe una correlación directa de los datos, con un coeficiente de correlación de 0,99, lo cual indica una similitud entre los datos.

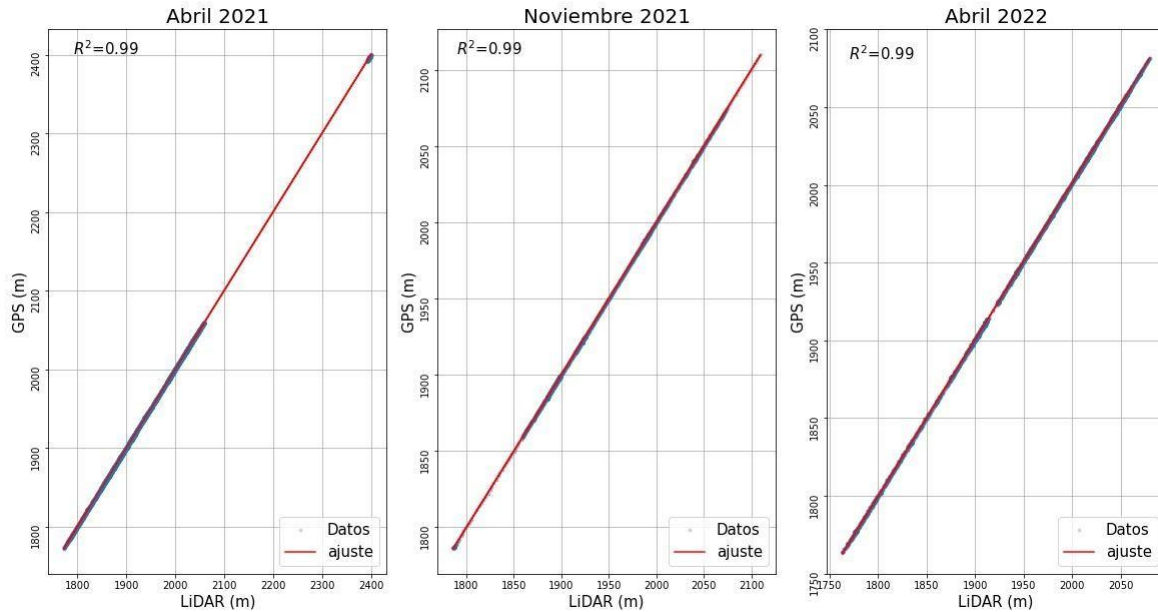


Figura 4.3-B. Comparación entre GPS cinemático y LiDAR.

Para el cálculo del balance de masa geodésico estival (entre noviembre de 2021 y abril 2022), se utilizó la densidad de la nieve y hielo, ponderado por el tiempo transcurrido entre las observaciones realizadas en terreno. En cada época se calculó un raster interpolado con la densidad estimada en cada baliza. En la tabla 4.3-B se muestran los valores de densidad promedio utilizados en el balance de masa geodésico estival.

Tabla 4.3-B. Resumen de la densidad utilizada en el balance de masa geodésico de verano 2021-2022.

Mes	Días	Ponderación	Densidad (g/cm ³)
Noviembre	20	0,1	0,57
Diciembre	36	0,2	0,60
Febrero	56	0,4	0,73
Abril	52	0,3	0,75
SUMA/Promedio	164	1	0,694

Fuente: Elaboración propia.

En el cálculo del balance de masa geodésico de invierno (abril hasta noviembre de 2021) se utilizó una densidad de nieve de 582 kg/m^3 , la cual fue medida en terreno en noviembre. Para calcular el balance de masa geodésico anual del periodo 2021-2022 se utilizó la densidad propuesta por Huss en 2013 de 850 kg/m^3 .

Tabla 4.3-C. Resumen de cambios de volumen y balance de masa geodésico para cada periodo.

Periodo	Cambio de Volumen (km^3)	Cambio de elevación total (m)	Cambio de elevación (m eq.a.)
invierno 2021	0,01	$4,19 \pm 0,11$	$2,44 \pm 0,09$
verano 2021/22	-0,03	$-8,52 \pm 0,44$	$-5,97 \pm 0,37$
anual 2022-2021	-0,02	$-4,16 \pm 0,95$	$-3,54 \pm 0,81$

Fuente: Elaboración propia.

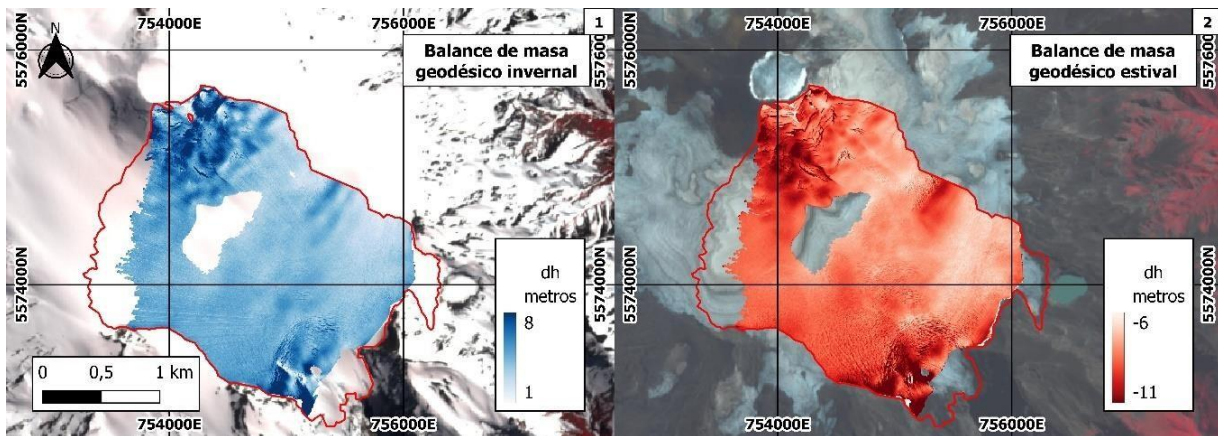


Figura 4.3-C. Mapa de tasa de cambio de elevación para el glaciar Mocho (dh). 1: Balance de masa geodésico invernal. 2: Balance de masa geodésico estival.

La figura 4.3-C, muestra la distribución espacial de los cambios de elevación para el periodo invernal y estival. El balance invernal obtenido por los cambios de elevación para el glaciar Mocho es de $2,44 \pm 0,09 \text{ m eq.a.}$ (Tabla 4.3-C). Gran parte del glaciar presenta acumulación, menos en dos zonas (Figura 4.3-C). La primera zona se presenta entre los rangos 1750-1800 m s.n.m., si bien el promedio de este rango es positivo, se puede apreciar un pequeño

sector de ablación, cercana a un lago supraglaciario, también en la zona de la cumbre podemos notar áreas en donde la ablación llega a los $-2,44$ m eq.a., producto de la migración de los seracs desde la cumbre.

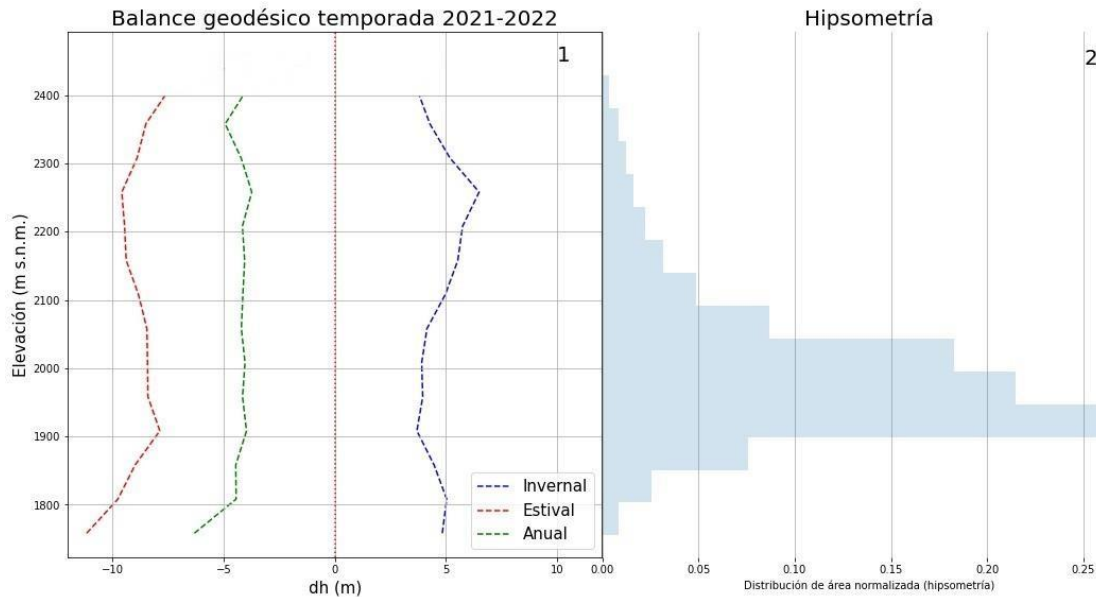


Figura 4.3-D. Balance de masa geodésico 2021-2022 del glaciar Mocho. 1: Balance geodésico en función de la altura. 2: Perfil hipsométrico del glaciar.

Para el periodo estival (Figura 4.3-C) el glaciar presentó una pérdida de $-5,97 \pm 0,37$ m eq.a., revelando una reducción de masa en todo el rango altitudinal (Figura 4.3-C; Figura 4.3-D), pero mostrando una merma en el cambio de elevación a medida que se aumenta en altitud.

El balance geodésico anual para el glaciar Mocho es de $-3,54 \pm 0,81$ m eq.a. (Tabla 4.3-C), en este periodo no se logra discernir entre zonas de acumulación y de ablación, ya que el glaciar perdió masa en todas las bandas altitudinales, por lo tanto, la línea de equilibrio de masa está por sobre la altura máxima del glaciar (Figura 4.3-E), derritiendo más masa que la acumulada en invierno.

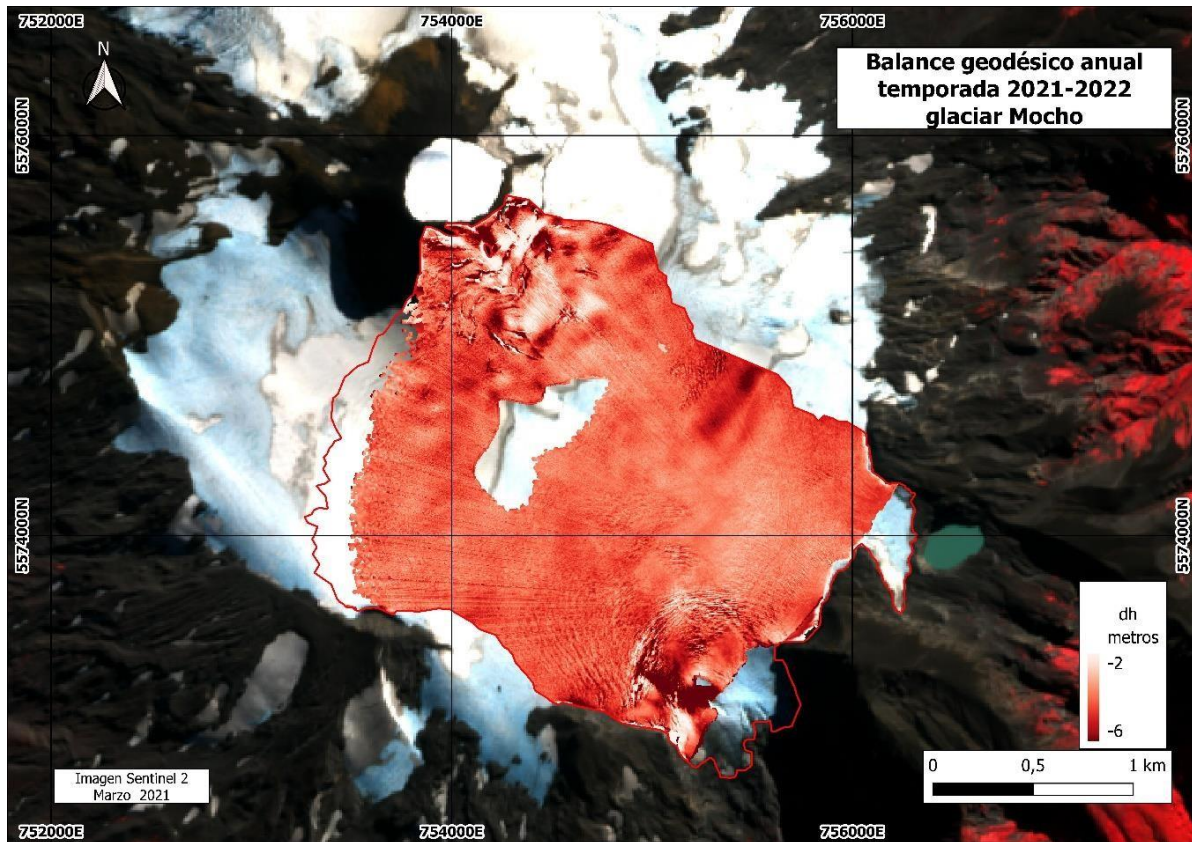


Figura 4.3-E. Balance geodésico anual del glaciar Mocho. La imagen de fondo corresponde a una Sentinel 2 del 25 de marzo de 2021.

4.4. Comparación de Resultados del Balance de Masa

Se compararon los datos calculados en el balance glaciológico y geodésico (Tabla 4.4.1-A; Figura 4.4.1-A), para ello se realizó una corrección del balance superficial de acumulación y ablación, sumando y restando respectivamente, el resultado del balance de masa obtenido en el periodo comprendido desde el 8 de octubre hasta el 18 de noviembre (Tabla 4.2.3-A) que fue de $0,04 \pm 0,009$ m eq.a., de esta forma el balance de masa glaciológico es comparable con el balance de masa geodésico, ya que corresponde al mismo espacio de tiempo evaluado con el método geodésico.

4.4.1. Balances de masa glaciológico y geodésico

Al revisar los resultados de ambos métodos, podemos observar que existe una gran similitud entre ellos, de acuerdo con el valor RMSE obtenido en la comparación. Las diferencias se pueden explicar por procesos internos y basales del glaciar que se ven reflejados en la diferencia de altura entre la superficie medida con LiDAR y el balance de masa glaciológico y también por efecto de la interpolación, que no es capaz de reproducir la realidad con el nivel de detalle logrado con el método geodésico, debido al distanciamiento de las balizas y datos GPR.

Tabla 4.4.1-A. Comparación de balances de masa glaciológico y geodésico.

Periodo	BM corregido (m eq.a.)	Balance geodésico (m eq.a.)	RMSE
Invernal 2021	2,97±0,30	2,44±0,09	±0,85
Estival 2021/2022	-5,53±0,39	-5,97±0,37	±1,06
Anual 2021/2022	-2,56±0,24	-3,54±0,81	±1,98

Fuente: Elaboración propia. BM= Balance de masa glaciológico.

En la figura 4.4.1-A se puede apreciar que en los periodos evaluados los valores resultantes tienen un comportamiento similar en su distribución altitudinal, dado por la semejanza de las curvas descritas por ambos métodos, aunque en general el método glaciológico sobreestima los resultados a partir de los 1900 m de altitud.

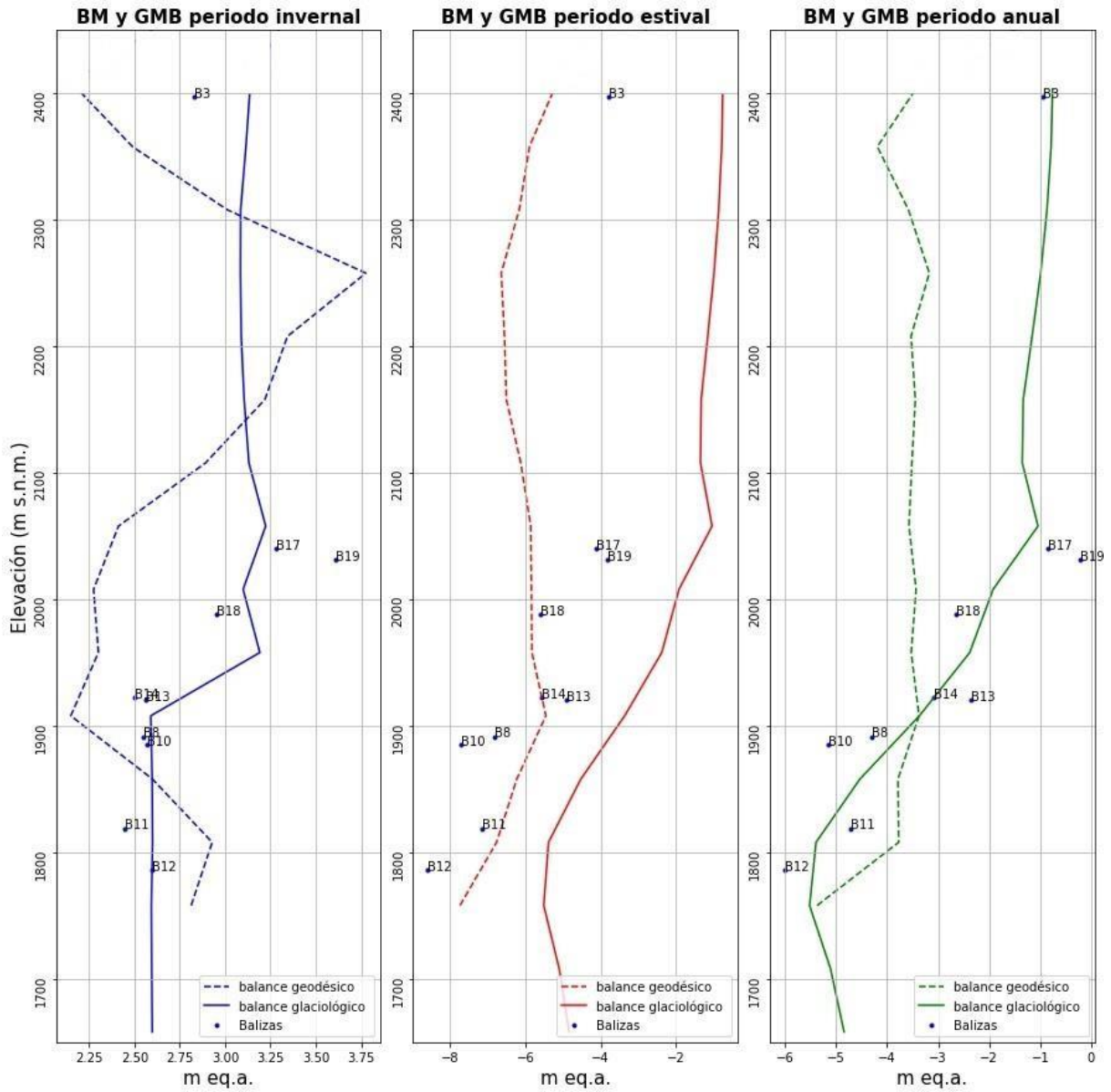


Figura 4.4.1-A. Comparación del balance glaciológico y geodésico, periodo invernal, periodo estival y periodo anual.

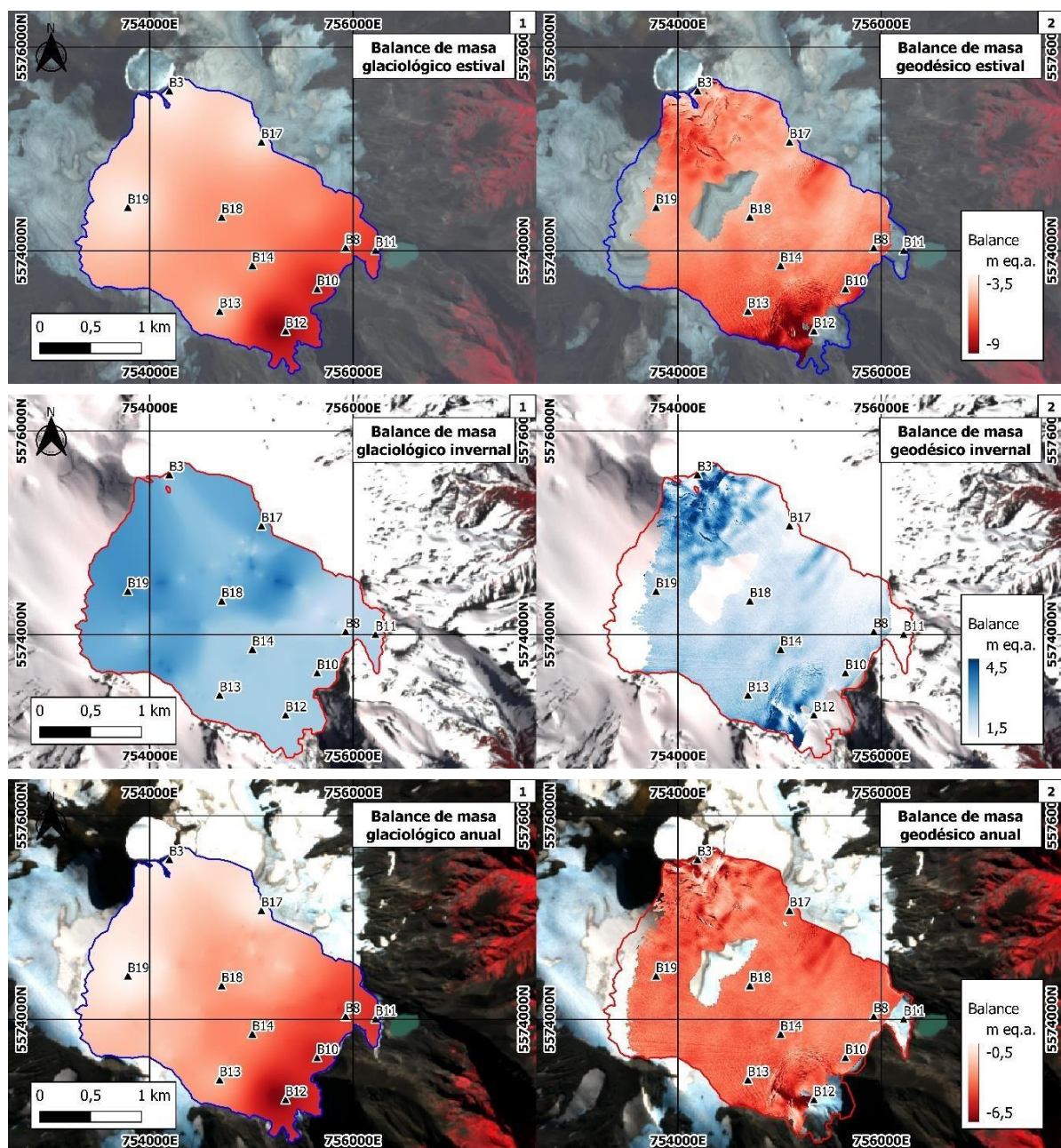


Figura 4.4.1-B. Comparación del balance de masa del glaciar Mocho temporada 2021-2022. 1: Balance de masa glaciológico. 2: Balance de masa geodésico.

En la figura 4.4.1-B se muestran los resultados del balance de masa glaciológico y el balance de masa geodésico para la temporada 2021-2022, en ellos se puede apreciar en detalle cómo es la distribución del balance de masa y los valores obtenidos por cada

método, es notable la resolución obtenida por el método geodésico donde se logra distinguir con mayor realismo el fenómeno de cambios de masa en el glaciar.

4.4.2. GPR y Balance de masa geodésico

Se compararon datos de acumulación obtenidos mediante dos métodos, el primero es la medición con radar (Tabla 4.4.2-A), este presenta una acumulación promedio de $5,04 \pm 0,50$ m, mientras que el método geodésico nos entregó un promedio de $4,19 \pm 0,11$ m de nieve acumulada durante el invierno.

Para poder analizar ambos métodos, se aplicó una corrección al método GPR, esta se basa en sumar el resultado de las mediciones realizadas entre octubre y noviembre, de las balizas de acumulación instaladas en el glaciar, hasta el día en que se levantó la topografía del glaciar mediante LiDAR terrestre. Esta corrección se realiza para que ambos métodos sean comparables en una escala temporal, para ello utilizamos el valor promedio obtenido en noviembre de $0,07 \pm 0,015$ m.

Si bien existen diferencias entre ambas mediciones, el error cuadrático medio es de $\pm 0,14$ metros.

Tabla 4.4.2-A. Resumen de la acumulación medida mediante dos métodos.

Método	Fecha	Acumulación promedio (m)
Radar GPR	8-10-2021	$5,04 \pm 0,50$
Balance geodésico	27-04-2021 al 18-11-2021	$4,19 \pm 0,11$
GPR corregido	18-11-2021	$5,11 \pm 0,51$

Fuente: Elaboración propia.

4.5. Mediciones con GPS GNSS

En los sitios propuestos para la medición de ablación, donde se instaló una baliza en cada sitio durante la campaña de noviembre de 2021, se determinó la posición geográfica por medio de un sistema GNSS con corrección diferencial. Estas mediciones se repitieron en las

campañas sucesivas, obteniéndose el registro de las coordenadas en cuatro ocasiones en total en la mayoría de las balizas, el resultado de los datos procesados se muestra en la tabla 4.5-A.

Tabla 4.5-A. Coordenadas de las balizas obtenidas por las mediciones GNNS.

Baliza	Fecha	N° días acumulados	X (m)	Y (m)	Z (m)
B8	2021-11-19	0	755927,135	5574037,107	1891,597
B8	2022-02-17	90	755927,169	5574036,274	1885,455
B8	2022-04-08	50	755927,291	5574035,855	1884,293
B10	2021-11-17	0	755647,509	5573631,709	1885,003
B10	2021-12-23	36	755647,364	5573630,818	1882,548
B10	2022-02-17	56	755647,012	5573629,560	1877,798
B10	2022-04-08	50	755646,760	5573628,481	1876,115
B11	2021-11-19	0	756221,323	5574009,133	1819,032
B11	2021-12-22	33	756221,414	5574009,041	1816,966
B11	2022-04-08	107	756221,643	5574008,937	1809,752
B12	2021-11-17	0	755336,737	5573218,043	1786,419
B12	2021-12-23	36	755337,991	5573216,093	1785,174
B12	2022-02-17	56	755340,182	5573212,351	1780,370
B12	2022-04-08	50	755339,877	5573209,637	1777,252
B13	2021-11-19	0	754688,030	5573411,972	1920,148
B13	2021-12-23	34	754690,393	5573410,922	1917,983
B13	2022-02-17	56	754694,603	5573409,062	1912,694
B13	2022-04-08	50	754698,109	5573407,125	
B14	2021-11-19	0	755009,790	5573862,001	1922,442
B14	2021-12-23	34	755011,137	5573860,514	1920,172
B14	2022-02-17	56	755013,179	5573858,001	1914,870
B14	2022-04-08	50	755015,123	5573855,687	1912,523
B15	2021-10-04	0	755516,534	5574415,723	1924,567
B15	2021-12-22	79	755517,781	5574413,877	1921,926
B15	2022-02-16	56	755518,558	5574412,554	1917,266
B15	2022-04-08	51	755519,357	5574411,415	1915,953
B17	2021-11-19	0	755098,539	5575076,871	2040,276
B17	2021-12-22	33	755099,357	5575075,305	2038,269
B17	2022-02-16	56	755100,981	5575072,889	2033,189
B18	2021-11-17	0	754707,128	5574338,372	1988,020
B18	2021-12-23	36	754707,859	5574337,008	1985,986
B18	2022-02-17	56	754709,103	5574334,947	1981,431
B18	2022-04-08	50	754710,157	5574333,357	1979,448

Baliza	Fecha	Nº días acumulados	X (m)	Y (m)	Z (m)
B19	2021-11-17	0	753784,552	5574432,771	2031,444
B19	2021-12-23	36	753785,182	5574431,750	2029,200
B19	2022-02-17	56	753785,979	5574430,216	2024,668
B19	2022-04-08	50	753786,809	5574428,788	2022,733

Fuente: Elaboración propia.

Gracias a la alta precisión de las mediciones GNSS, se puede observar el desplazamiento horizontal de las balizas entre noviembre y abril, como consecuencia del movimiento del glaciar, (Tabla 4.5-B; Figura 4.5-A) y también su variación vertical, lo cual se debe mayoritariamente a la fusión de nieve y hielo (Tabla 4.5-C).

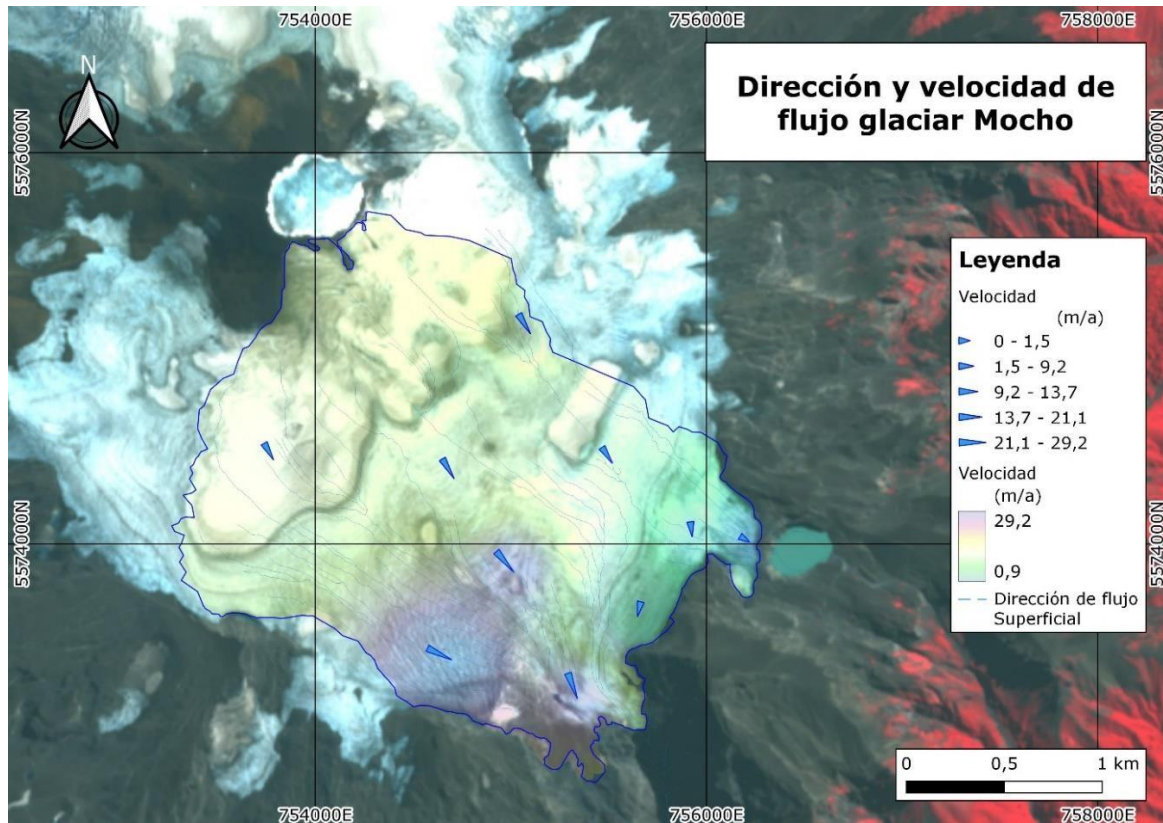


Figura 4.5-A. Desplazamiento horizontal de las balizas observado entre noviembre de 2021 y abril 2022. La imagen de fondo corresponde a una Sentinel2 del 14 de marzo de 2022.

Tabla 4.5-B. Desplazamiento y velocidades estimadas.

Baliza	Desplazamiento total medido en el período noviembre 2021-abril 2022 (m)	Nº de días acumulados desde la 1ª medición	Velocidad (m/a) noviembre 2021-abril 2022	Velocidad (m/a) enero-abril 2021 (DGA, 2021)	Cambio de Velocidad (%)
B8	1,27	140	3,31	2,6	21%
B10	3,32	142	8,53	9,1	-7%
B11	0,38	140	0,99	2,2	-122%
B12	9,38	142	24,11	29,5	-22%
B13	11,19	140	29,17	30,8	-6%
B14	8,26	140	21,54	20,8	3%
B15	5,15	186	10,11	8,9	12%
B17	4,68	89	19,19	20,3	-6%
B18	5,86	142	15,06	12,2	19%
B19	4,58	142	11,77	8,9	25%

Fuente: Elaboración propia.

En comparación con las velocidades reportadas en DGA (2021), se puede apreciar que las velocidades observadas en este estudio fueron ligeramente menores, aunque también se puede advertir cierto grado de aceleración en B15, B18 y B19 (Tabla 4.5-B). Esto puede deberse a diferentes factores, como por ejemplo a una desaceleración del glaciar por la pérdida de masa o al bajo aporte de masa debido a la escasez de precipitaciones. En la baliza B13 se observó el mayor desplazamiento de la temporada con 11,19 m (Tabla 4.5-B), lo cual representa una disminución de la velocidad de 1,63 m/a en este punto. En la baliza B11 el movimiento horizontal fue mínimo registrándose 38 cm de desplazamiento en total, esto nos permite ver que la velocidad del glaciar en este punto se redujo aproximadamente la mitad respecto de la temporada anterior.

En la tabla 4.5-C se muestran los resultados de cambio de altura obtenidos con GNSS, al compararlos con las mediciones de altura de balizas vemos que en B17 y B18 son bastante similares, con diferencias de 7 cm y 5 cm respectivamente. En la baliza B19 se obtuvo una mayor diferencia de 1,4 m, seguido por la B12 y B8 con 1,15 m y 1,13 m.

Tabla 4.5-C. Variación vertical medida con GNSS.

Baliza	Mov. horizontal GPS (m)	Δz GPS (m)	Pend. DEM (%)	Δz por mov. (m)	Δz corregido GPS (m)	Δh Altura de Balizas (m)
B8	1,27	-7,30	12%	0,15	-7,15	-8,28
B10	3,32	-8,89	10%	0,33	-8,56	-9,34
B11	0,38	-9,28	32%	0,12	-9,16	-9,46
B12	9,38	-9,17	13%	1,22	-7,95	-9,10
B13	7,19	-7,45	9%	0,65	-6,80	-7,03
B14	8,26	-9,92	18%	1,49	-8,43	-8,00
B15	5,15	-8,61	2%	0,10	-8,51	-8,18
B17	4,68	-7,09	14%	0,66	-6,43	-6,50
B18	5,86	-8,57	11%	0,64	-7,93	-7,98
B19	4,58	-8,71	9%	0,41	-8,30	-6,90

Fuente: Elaboración propia.

5. PLAN DE CONTINGENCIA Y TRABAJO SEGURO

A continuación, se presenta información respecto de los procedimientos para el desarrollo del trabajo seguro, planes de contingencia por riesgos volcánico, sanitario (COVID-19) y accidentes.

5.1. Antecedentes Generales

Las actividades para realizar en el glaciar son; instalación y medición de balizas, levantamiento con instrumento GPS diferencial de cada baliza, mediciones de densidad, levantamiento LiDAR terrestre y levantamiento con RADAR de 350 MHz. Para esto se deben realizar desplazamientos y estadía por periodos cortos en el terreno, lo cual podría generar una situación de emergencia.

Se entenderá como emergencia producto de las actividades, aquellos sucesos que generen alteración en el normal desplazamiento de las personas involucradas en la ejecución de los estudios o situaciones que puedan ocurrir en el desarrollo de las actividades, tales como:

De origen de variables naturales y climáticas:

- Tormentas
- Avalanchas

De origen antrópico:

- Caída a grietas
- Congelamiento por exposición
- Lesiones producidas por caídas

Del equipos y equipamiento:

- Accidentes en moto de Nieve
- Desperfectos en equipos e instrumentos

5.2. Objetivos

5.2.1. Objetivo General

Mantener un monitoreo constante de las condiciones adversas y una adecuada coordinación con los organismos técnicos locales e instituciones vinculadas al sector, considerando que se podrían generar incidentes o situaciones de origen natural o antrópico que puedan afectar a las personas y/o que no permitan el normal desarrollo de los trabajos.

5.2.2. Objetivos Específicos

- Reforzar las medidas preventivas que disminuyan la probabilidad de alguna emergencia.
- Reforzar la coordinación con organismos técnicos de rescate.
- Coordinar el mejor uso de los recursos disponibles

5.3. Vigencia del Plan

Tabla 5.3-A. Vigencia del plan de contingencia y trabajo seguro.

Inicio vigencia		Término vigencia	
Fecha	Hora	Fecha	Hora
21/09/2021	5:00	31/08/2022	18:00

Fuente: Elaboración propia.

La presente prestación de servicios especializados se enmarca dentro de la realización de un trabajo de asistencia a la UGN en el monitoreo de detalle intensivo (nivel 2) en el glaciar sur-oriental del volcán Mocho.

Las características típicas de este macizo volcánico, a pesar de estar situado por debajo de la altitud que definen Alta montaña de Montaña, que está normado desde los 3000 metros sobre el nivel del mar (D.S. Nº 594/00 del Ministerio de Salud), cuenta con la mayoría de los elementos de ésta (hielo, nieve, grietas), lo que implica riesgos asociados al trabajar en estos escenarios.

En atención a lo anterior y al posible aumento de vulnerabilidad asociado a este trabajo, se establece este plan de contingencia para la coordinación interna, como también la coordinación entre los organismos técnicos e instituciones pertinentes en la atención y manejo de emergencias locales.

5.4. Identificación de Escenarios

El sector donde se realizan las actividades se enmarca en las caras Este, Sur Este y Sur este del glaciar Mocho así mismo en la cumbre de este complejo volcánico, lo que cuenta con condiciones adversas, tanto topográficas como climáticas, lo que hace necesario un monitoreo constante de estas variables.

5.4.1. Ubicación Geográfica de la Zona



Figura 5.4.1-A. Ubicación del área de trabajo.

5.4.2. Identificación y Descripción de Escenarios posibles

A continuación, se enumeran los escenarios posibles de acuerdo con la situación de peligro y riesgo asociado al trabajo en el glaciar.

Tabla 5.4.2-A. Descripción de Escenarios y Amenazas.

Escenario	Tipo de amenaza	Descripción de la amenaza	Efectos potenciales
1	Natural	Sismo de mayor intensidad	Corte de caminos, avalanchas
2	Natural	Actividad Volcánica	Derrumbe en caminos, lahares, flujo de lavas, colapso de piroclastos
3	Antrópico	Lesiones producidas por caídas	Impedimento del normal desplazamiento
4	Antrópico	Accidente vehicular en nieve	Impedimento del normal desplazamiento y lesiones leves, graves
5	Antrópico	Accidentes en caminos de acceso	Impedimento del normal desplazamiento a lugares de retorno y lesiones leves, graves

Fuente: Elaboración propia.

5.5. Estrategia de Respuesta

5.5.1. Medios de Telecomunicación

Tabla 5.5.1-A. Medios de Telecomunicación.

Medios de Telecomunicación									
Telefonía			Radio Comunicación				Satelital		
Fija	Móvil	Línea Privada	VHF	UHF Tracking	HF ALE	HF VFO	P-25	Telefonía	Internet
x	x		x					x	x

Fuente: Elaboración propia.

La utilización de distintos equipos y sistemas de comunicación es esencial ya que en eventuales emergencias de magnitud mayor algunos sistemas colapsan.

5.5.2. Evaluación y Respuesta

Ante la salida del grupo de trabajo se tomarán en consideración las siguientes variables antes de efectuar una acción:

- Evaluación de pronóstico meteorológico
- Aviso de salida a los organismos pertinentes de montaña (Socorro andino)
- Revisión de equipamiento y maquinaria
- Evaluación de las condiciones del terreno (Nieve, hielo, grietas)

5.6. Planes Sectoriales

De acuerdo con lo mencionado en escenarios probables, en caso de emergencias relacionadas con sismo/tsunami y erupción volcánica, se aplicarán las planificaciones regionales y comunales vigentes para estas variables.

5.6.1. Plan de Contingencia por Variable Volcánica Mocho

En atención a la actual situación se tomarán las acciones vigentes en este plan.

5.6.2. Plan de Contingencia por Emergencia Sanitaria (COVID-19)

En atención a la actual situación sanitaria se tomarán las acciones vigentes en este plan y en atención a las normas sanitarias del momento.

5.7. Coordinación

Con el fin de realizar coordinaciones ante eventual emergencia se establecerá coordinación con; Departamento de prevención de riesgos UACH, Socorro Andino Región de Los Ríos, Carabineros y empresas locales.

6. CONCLUSIONES

Este proyecto tenía como objetivo continuar el monitoreo en detalle del glaciar suroriental del Volcán Mocho y dar continuidad al trabajo presentado en el informe S.I.T 479 (DGA, 2021). En contraste con el trabajo anterior, en este no sólo se presentaron mediciones de ablación sino también de acumulación, se midió un año hidrológico completo. Junto con los levantamientos repetidos del LIDAR, estos datos nos dan información muy detallada sobre el estado del glaciar durante el año hidrológico 2021-2022. La abundancia de datos adquiridos para este proyecto también nos dio la posibilidad de comparar diferentes métodos para inferir el balance de masa del glaciar.

El cambio de área del glaciar en el año hidrológico 2021-2022 fue de $-0,1 \text{ km}^2$, lo que corresponde aproximadamente a un 2% de su superficie en 2021. Con este cambio el glaciar mantiene su tasa alta de reducción de área, la cual se observa desde el año 2019.

El balance de masa anual obtenido por el método glaciológico fue de $-2,56 \pm 0,24 \text{ m eq.a.}$, que es el valor más negativo reportado hasta el momento, cercano al valor de $-2,46 \text{ m eq.a.}$ que fue reportado para el año 2016/17 (WGMS, 2020). Este valor tan negativo fue acompañado de pérdidas de masa en toda la superficie del glaciar (Figura 4.2.4-B), lo que implica que la línea (teórica) de equilibrio estuvo a una altura mayor a la elevación máxima del glaciar (2.400 m). La acumulación anual determinada por las mediciones de radar era $2,93 \pm 0,29 \text{ m eq.a.}$ y la ablación, determinada por las mediciones en la red de balizas fue de $-5,49 \pm 0,40 \text{ m eq.a.}$

Complementario al balance de masa glaciológico, se realizaron tres balances geodésicos a partir de datos obtenidos por mediciones con LiDAR en abril 2021, noviembre 2021 y abril 2022, los cuales fueron facilitados por la DGA. Los valores de balance de masa obtenidos con este método fueron: $2,44 \pm 0,09$ (balance de invierno 2021), $-5,97 \pm 0,37$ (balance de verano 2021) y $-3,54 \pm 0,81$ (balance anual 2021-2022). La incertidumbre de estos valores se debe principalmente a la incertidumbre de valores de elevación entregados por el LiDAR, que fueron determinados a partir de una comparación con datos de elevación obtenidos por receptores GNSS en modo cinemático durante el mismo día de los levantamientos LiDAR (Tabla 4.3-A).

Al comparar el balance glaciológico y el balance geodésico, el balance geodésico muestra valores más negativos en los tres balances (invierno, verano, anual), pero los valores coinciden dentro del intervalo de los errores. Valores más negativos del balance geodésico de invierno, podrían indicar que hay proceso de ablación en ciertos sectores del glaciar, antes de las primeras caídas de nieve, proceso que no está considerado en el balance glaciológico. Otros procesos que no están considerados en el balance glaciológico, pero sí en el balance geodésico, son procesos basales e intra-glaciales y basales que pudieran modificar el balance de masa del glaciar. Una vez que se logre reducir las incertidumbres de los balances geodésicos, se podrán hacer conclusiones más fuertes sobre la importancia de estos procesos para el balance de masa del glaciar Mocho.

La dinámica del glaciar observada por el movimiento de las balizas indicó una aceleración respecto de los valores del verano 2021, en la mitad de las balizas y una de desaceleración en la otra mitad. La desaceleración porcentual máxima observada fue en la baliza B11, donde la reducción fue más que el 50%. La aceleración máxima observada fue en la baliza B19, donde el aumento fue de un 32% (Tabla 4.5-A). La desaceleración de la baliza B11 se debe probablemente a un adelgazamiento y estancamiento del glaciar en este lugar que se encuentra cada vez más cerca del frente del glaciar (Figura 4.2.1-A). El aumento de velocidad en la baliza B19 se podría deber a un incremento de la pendiente en esta posición del glaciar, que podría estar causado por las grandes pérdidas de masa que experimentó el glaciar durante el periodo estival 2021-2022.

7. BIBLIOGRAFÍA

1. DIRECCION GENERAL DE AGUAS. 2021. Apoyo para el Monitoreo de Detalle Intensivo del Glaciar Sur-oriental del Volcán Mocho, Región De Los Ríos, Macrozona Sur, 2020-2021. S.I.T. N°479. Realizado por Universidad Austral de Chile.
2. DIRECCION GENERAL DE AGUAS. 2014. Estimación de volúmenes de hielo mediante sondeos de radar en zonas norte, central y sur. Realizado por Geoestudios. S.I.T. N°338.
3. DIRECCION GENERAL DE AGUAS. 2013. Implementación nivel 2 estrategia nacional de glaciares: Mediciones glaciológicas terrestres en Chile central, zona Sur y Patagonia. Realizado por Geoestudios. S.I.T. N°327.
4. DIRECCION GENERAL DE AGUAS. 2011. Variaciones recientes de glaciares en Chile, según principales zonas glaciológicas. Realizado por Centro de Estudios Científicos. S.I.T. N°261.
5. FARÍAS-BARAHONA, D., VIVERO, S., CASASSA, G., SCHAEFER, M., BURGER, F., SEEHAUS, T., IRIBARREN-ANACONA, P., ESCOBAR, F. & BRAUN, M. 2020. Geodetic mass balance and area changes of Echaurren Norte glacier (Central Andes, Chile) between 1955 and 2015. *Remote sensing*. 11, 260.
6. FISCHER, M., HUSS, M., KUMMERT, M. & HOELZLE, M. 2016. Application and validation of long-range terrestrial laser scanning to monitor the mass balance of very small glacier in the Swiss Alps. *The Cryosphere*, 10, 1279-1295.
7. HUSS, M. 2013. Density assumptions for converting geodetic glacier volume change to mass change. *The Cryosphere*, 7, 877-887.
8. NUTH, C. & KAAB. 2011. Co-registration and bias correction of satellite elevation data sets for quantifying glacier thickness change. *Cryosphere* 5,271-290

9. RIVERA, A., BOWN, F., CASASSA, G., ACUÑA, C. & CLAVERO, J. 2005. Glacier shrinkage and negative mass balance in the Chilean lake District (40°S). *Hydrological Sciences-journal-des Sciences Hydrologiques*, 50(6).
10. RIVERA, A., BOWN, F., MELLA, R., WENDT, J., CASASSA, G., ACUÑA, C., RIGNOT, E., CLAVER, J. & BROCK, B. 2006. Ice volumetric changes on active volcanoes in southern Chile, *Annals of Glaciology*, 43, 111-122.
11. SCHAEFER, M., RODRÍGUEZ, J.L., SCHEITER, M. & CASASSA, G. 2017. Climate and surface mass balance of Mocho Glacier, Chilean Lake District, 40° S. *Journal of Glaciology*, 1-11.
12. WATSON, D. F., PHILIP G. M. 1985. A Refinement of Inverse Distance Weighted Interpolation. *Geoprocessing 2*, 315-327.
13. WISE, S. 2011. Cross-validation as a means of investigating DEM interpolation error. *Computers & Geosciences*. 37. 978-991.
14. ZEMP, M., GÄRTNER-ROER, I., NUSSBAUMER, S.U., BANNWART, J., RASTNER, P., PAUL, F. AND HOELZLE, M. 2020. *Global Glacier Change Bulletin No. 3 (2016-2017)*. (eds.), ISC(WDS)/IUGG(IACS)/UNEP/UNESCO/WMO, World Glacier Monitoring Service, Zurich, Switzerland, 274 pp.
15. ZEMP, M., THIBERT, E., HUSS, M., ROLSTAD DENBY, C., NUTH, C. & ANDREASSEN, L. 2013. Reanalyzing glacier mass balance measurement series. *The Cryosphere*, 7, 1227-1245.

ANEXO I

Campañas de Terreno

Se realizaron 5 campañas de terreno (Tabla A I-A) para facilitar el cumplimiento de los objetivos específicos del estudio "APOYO PARA EL MONITOREO DE DETALLE INTENSIVO DEL GLACIAR SUR-ORIENTAL DEL VOLCÁN MOCHO, REGIÓN DE LOS RÍOS, MACROZONA SUR, 2021-2022".

Tabla A I-A. Campañas de terreno temporada 2021-2022.

	Fecha Estimada	Actividades
Campaña N°1	4 y 8 octubre 2021	<ul style="list-style-type: none">Levantamiento de espesor de nieve con RADAR de 350 MHz.Instalación de AWS en el glaciar.Medición de balizas de acumulación con huincha métrica.Medición de densidad de nieve en pozo.
Campaña N°2	17-19 noviembre 2021	<ul style="list-style-type: none">Instalación de balizas de ablación de 10 m. con taladro Heucke.Levantamiento de coordenadas de balizas con GNSS.Levantamiento del glaciar Sur-oriental del volcán Mocho con LiDAR terrestre, que será realizado por un funcionario de la UGN mediante un instrumento de la UGN.Medición de densidad de nieve en pozo.Medición de balizas con huincha métrica.
Campaña N°3	22-23 diciembre 2021	<ul style="list-style-type: none">Levantamiento de coordenadas de balizas con GNSS.Medición de densidad de nieve en pozo.Medición de balizas con huincha métrica.
Campaña N°4	16-18 febrero 2022	<ul style="list-style-type: none">Levantamiento de coordenadas de balizas con GNSS.Medición de densidad de nieve en pozo.Medición de balizas con huincha métrica.
Campaña N°5	8 abril 2022	<ul style="list-style-type: none">Levantamiento del glaciar Sur-oriental del volcán Mocho con LiDAR terrestre que será realizado por un funcionario de la UGN mediante un instrumento de la UGN.Levantamiento de coordenadas de balizas con GNSS.Medición de densidad de nieve en pozo.Medición de balizas con huincha métrica.

Fuente: Elaboración propia.

Campaña N°1 (4 y 8 de octubre de 2021).

Objetivo 4: Durante esta campaña se realizó un levantamiento de datos de espesor de nieve con RADAR (GPR) de 350 MHz (Figura A I-A).

Objetivo 5: Instalación de Estación Meteorológica Automática (AWS) sobre la superficie del glaciar, la cual se mantuvo en operación hasta fines del año hidrológico 2021-2022 (Figura A I-B). La AWS consta de los siguientes instrumentos:

- Sensor de temperatura y humedad relativa
- Anemómetro
- Sensor de radiación incidente y reflejada
- Sensor de altura de nieve
- Datalogger Campbell CR-1000

La AWS quedó ubicada a un costado de B18 (Figura 4.2.1-A), la que desafortunadamente fue encontrada volcada al interior de una grieta en una visita posterior, debido a que la estructura resbaló por el hielo.



Figura A I-A. Levantamiento con GPR de 350 MHz.

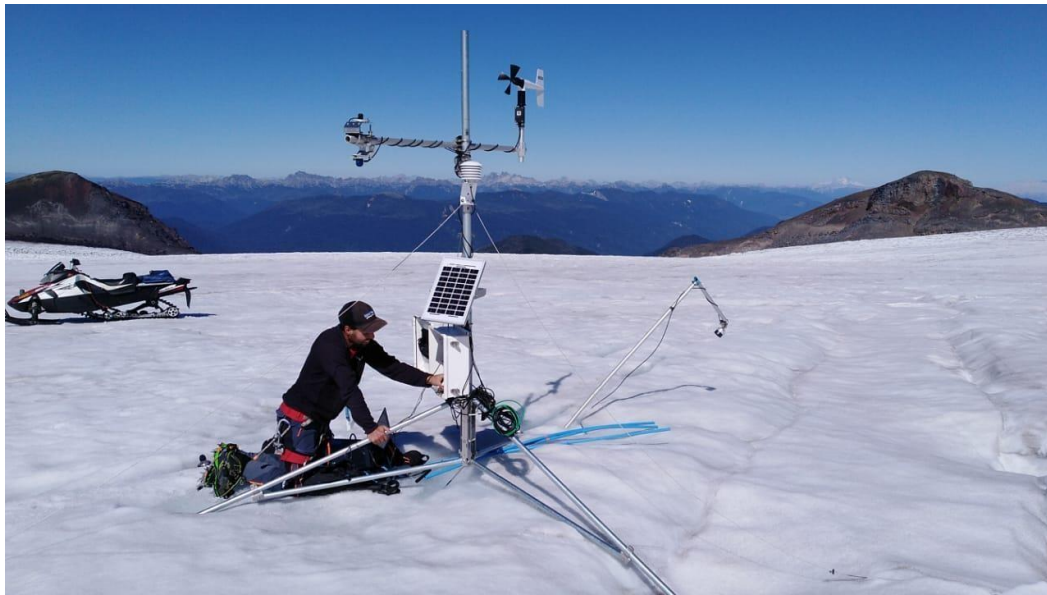


Figura A I-B. Estación Meteorológica Automática sobre glaciar.

Otra actividad ejecutada durante esta campaña fue la excavación de un pozo de un metro y medio de profundidad en la nieve, para la estimación de la densidad del manto de nieve. (Figura A I-E) (Tabla A I-C). Además, se midió la altura de balizas de acumulación ya instaladas en el glaciar (Figura A I-F) (Tabla A I-B).

Tabla A I-B. Medición de altura de balizas del glaciar Mocho octubre 2021.

Baliza N°	Tipo baliza	Largo total baliza (cm)	Altura época anterior (B) (cm)	Altura original visita actual (C) (cm)	Altura modificada visita actual (cm)	Diferencia altura (B-C) (cm)	Tipo sup.	Comentario
B08	Alu	300	-	-	149		nieve	
B10	Alu	300	-	-	173		nieve	
B11	Alu	300	-	-	150		nieve	
B12	Alu	300	-	125	125		nieve	
B13	Alu	300	-	-	167		nieve	
B14	Alu	300	-	-	198		nieve	
B15	Alu	300	-	-	192		nieve	
B17	Alu	700	-	126	126		nieve	
B18	Alu	600	-	-	185		nieve	

Baliza N°	Tipo baliza	Largo total baliza (cm)	Altura época anterior (B) (cm)	Altura original visita actual (C) (cm)	Altura modificada visita actual (cm)	Diferencia altura (B-C) (cm)	Tipo sup.	Comentario
B19	Alu	300	-	-	201		nieve	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla A I-C. Medición de densidad de nieve en B18 con muestreador metálico tipo cuña, octubre 2021.

Profundidad (cm)	Peso muestra (g)	Volumen (cm ³)	Densidad (g/cm ³)	Densidad (%)
0-10	378	1000	0,378	37,8
10-20	353	1000	0,353	35,3
20-30	381	1000	0,381	38,1
30-40	419	1000	0,419	41,9
40-50	397	1000	0,397	39,7
50-60	486	1000	0,486	48,6
60-70	428	1000	0,428	42,8
70-80	451	1000	0,451	45,1
80-90	492	1000	0,492	49,2
90-100	514	1000	0,514	51,4
100-110	519	1000	0,519	51,9
110-120	596	1000	0,596	59,6
120-130	560	1000	0,560	56,0
130-140	637	1000	0,637	63,7
140-150	580	1000	0,580	58,0
Promedio			0,479	47,9

Fuente: Elaboración propia.

Campaña N°2 (17-19 de noviembre de 2021).

Objetivo 2: Se instalaron 10 balizas de PVC en cada sitio propuesto (*Objetivo 1*), para lo cual se realizó una perforación vertical en cada punto con taladro Heucke (Figura A I-C).

La baliza está compuesta por segmentos unidos con cordines, con la intención de que esta caiga al suelo o colapse cada vez que la ablación de nieve supere la longitud de un segmento, el largo total de cada baliza instalada se muestra en la Tabla A I-D. Una vez realizada la instalación se procedió con el levantamiento de las coordenadas con receptor GNSS doble frecuencia en modo diferencial (Figura A I-D) y se midió la longitud del segmento o baliza expuesto sobre la superficie de nieve o hielo (Figura A I-F) (Tabla A I-D).

Objetivo 3: Se proporcionó apoyo logístico para el levantamiento con LIDAR terrestre del glaciar Sur-oriental del volcán Mocho (Figura A I-G) que fue realizado por el Sr. Jorge Huenante, funcionario de la UGN.

Tabla A I-D. Medición de altura de balizas del glaciar Mocho noviembre 2021.

Baliza N°	Tipo baliza	Largo total baliza (cm)	Altura época anterior (B) (cm)	Altura original visita actual (C) (cm)	Altura modificada visita actual (cm)	Diferencia altura (B-C) (cm)	Tipo sup.	Comentario
B08	PVC	1050	149	168	1	-19	nieve	
B10	PVC	1050	173	198	1	-25	nieve	
B11	PVC	1200	150	-	-10	-	nieve	
B12	PVC	1300	125	230	0	-105	nieve	10 cm de nieve
B13	PVC	1050	167	-	-11	-	nieve	
B14	PVC	1050	198	163	-6	35	nieve	
B15	PVC	1050	192	168	-22	24	nieve	
B17	PVC	1050	126	105	-14	21	nieve	
B18	PVC	1050	185	171	-6	14	nieve	
B19	PVC	1050	201	149	-17	52	nieve	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla A I-E. Medición de densidad de nieve en B18 con muestreador metálico tipo cuña, noviembre 2021.

Profundidad (cm)	Peso muestra (g)	Volumen (cm ³)	Densidad (g/cm ³)	Densidad (%)
0-10	139	250	0,556	55,6

Profundidad (cm)	Peso muestra (g)	Volumen (cm ³)	Densidad (g/cm ³)	Densidad (%)
10-20	139	250	0,556	55,6
20-30	166	250	0,664	66,4
30-40	143	250	0,572	57,2
40-50	154	250	0,616	61,6
50-60	138	250	0,552	55,2
60-70	150	250	0,600	60,0
70-80	144	250	0,576	57,6
80-90	146	250	0,584	58,4
90-100	137	250	0,548	54,8
Promedio			0,582	58,2

Fuente: Elaboración propia.



Figura A I-C. Instalación de balizas con taladro Heucke.

Se realizó la medición de densidad de nieve, en un pozo de un metro de profundidad (Figura A I-E) (Tabla A I-E).

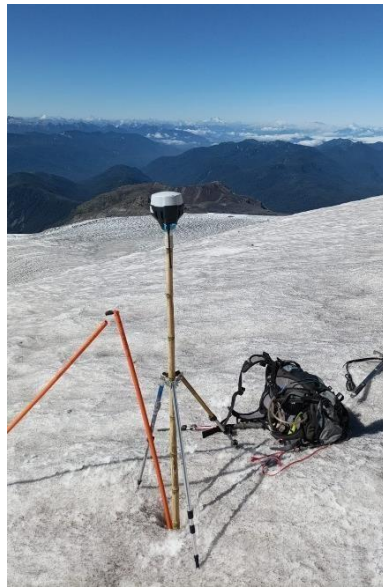


Figura A I-D. Levantamiento con receptor GNSS doble frecuencia.



Figura A I-E. Medición de densidad de nieve en pozo.



Figura A I-F. Medición de altura de baliza.

Campaña N°3 (22-23 diciembre de 2022).

Objetivo 6: Medir durante el mes de enero o febrero de 2022, y luego nuevamente en marzo o abril de 2022, en total en dos ocasiones, las coordenadas de cada una de las balizas mencionadas con receptor GNSS doble frecuencia en modo diferencial, y registrandola altura de cada baliza.

Tabla A I-F. Medición de altura de balizas del glaciar Mocho diciembre 2021.

Baliza N°	Tipo baliza	Largo total baliza (cm)	Altura época anterior (B) (cm)	Altura original visita actual (C) (cm)	Altura modificada visita actual (cm)	Diferencia altura (B-C) (cm)	Tipo sup.	Comentario
B08	PVC	1050	1	229	229	-228	nieve	18 cm de nieve
B10	PVC	1050	1	268	268	-267	nieve	2 cm de nieve
B11	PVC	1200	-10	220	220	-230	nieve	194 cm de nieve
B12	PVC	1300	0	198	198	-198	hielo	

Baliza N°	Tipo baliza	Largo total baliza (cm)	Altura época anterior (B) (cm)	Altura original visita actual (C) (cm)	Altura modificada visita actual (cm)	Diferencia altura (B-C) (cm)	Tipo sup.	Comentario
B13	PVC	1050	-11	209	209	-220	nieve	226 cm de nieve
B14	PVC	1050	-6	196	196	-202	nieve	259 cm de nieve
B15	PVC	1050	-22	181	181	-203	nieve	230 cm de nieve
B17	PVC	1050	-14	170	170	-184	nieve	406 cm de nieve
B18	PVC	1050	-6	186	186	-192	nieve	339 cm de nieve
B19	PVC	1050	-17	163	163	-180	nieve	497 cm de nieve

Fuente: Elaboración propia.

Se hizo el levantamiento de las coordenadas con receptor GNSS doble frecuencia en modo diferencial (Figura A I-D) y se determinó la longitud de las balizas que sobresale de la superficie de nieve o hielo (Figura A I-F) (Tabla A I-F). También se realizaron mediciones de densidad de nieve en pozo (Figura A I-E) (Tabla A I-G).

Tabla A I-G. Medición de densidad de nieve en B18 con muestreador metálico tipo cuña, diciembre 2021.

Profundidad (cm)	Peso muestra (g)	Volumen (cm ³)	Densidad (g/cm ³)	Densidad (%)
0-10	139	250	0,556	55,6
10-20	139	250	0,556	55,6
20-30	166	250	0,664	66,4
30-40	143	250	0,572	57,2
40-50	154	250	0,616	61,6
50-60	138	250	0,552	55,2
60-70	150	250	0,600	60,0
70-80	144	250	0,576	57,6
80-90	146	250	0,584	58,4
90-100	137	250	0,548	54,8
Promedio			0,582	58,2

Fuente: Elaboración propia.

Campaña N°4 (16-18 de febrero de 2022).

Objetivo 6: Medir durante el mes de enero o febrero de 2022, y luego nuevamente en marzo o abril de 2022, en total en 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.

Tabla A I-H. Medición de altura de balizas del glaciar Mocho febrero 2022.

Baliza N°	Tipo baliza	Largo total baliza (cm)	Altura época anterior (B) (cm)	Altura original visita actual (C) (cm)	Altura modificada visita actual (cm)	Diferencia altura (B-C) (cm)	Tipo sup.	Comentario
B08	PVC	1050	229	690	84	-461	hielo	
B10	PVC	1050	268	753	6	-485	hielo	
B11	PVC	1200	220	744	-9	-524	hielo	
B12	PVC	1300	198	718	718	-520	hielo	
B13	PVC	1050	209	692	89	-483	hielo	
B14	PVC	1050	196	636	36	-440	hielo	
B15	PVC	1050	181	655	56	-474	hielo	
B17	PVC	1050	170	636	36	-466	hielo	
B18	PVC	1050	186	619	17	-433	hielo	
B19	PVC	1050	163	542	92	-379	nieve	

Fuente: Elaboración propia.

Se hizo el levantamiento de las coordenadas con receptor GNSS doble frecuencia en modo diferencial (Figura A I-D) y se comprobó la altura de las balizas que sobresale de la superficie de nieve o hielo (Figura A I-F) (Tabla A I-H). También se realizaron mediciones de densidad de nieve en pozo (Figura A I-E) (Tabla A I-I).

Tabla A I-I. Medición de densidad de nieve en B19 con muestreador metálico tipo cuña, febrero 2022.

Profundidad (cm)	Peso muestra (g)	Volumen (cm ³)	Densidad (g/cm ³)	Densidad (%)
0-10	140	250	0,560	56

Profundidad (cm)	Peso muestra (g)	Volumen (cm ³)	Densidad (g/cm ³)	Densidad (%)
10-20	145	250	0,580	58
20-30	160	250	0,640	64
Promedio			0,593	59,3

Fuente: Elaboración propia.

Campaña N°5 (8 de abril de 2022).

Se proporcionó apoyo logístico para el levantamiento del glaciar Sur-oriental del volcán Mocho con LiDAR terrestre (Figura A I-G), que fue realizado por la Srta. Alejandra Espinoza, funcionario de la DGA (*Objetivo 7*).

Se realizó también, la medición de densidad de nieve en pozo y la altura de balizas con huincha métrica. (Figura A I-E; Figura A I-F).

Posteriormente, el 28 de abril se descargaron los datos de la AWS (Anexo III).

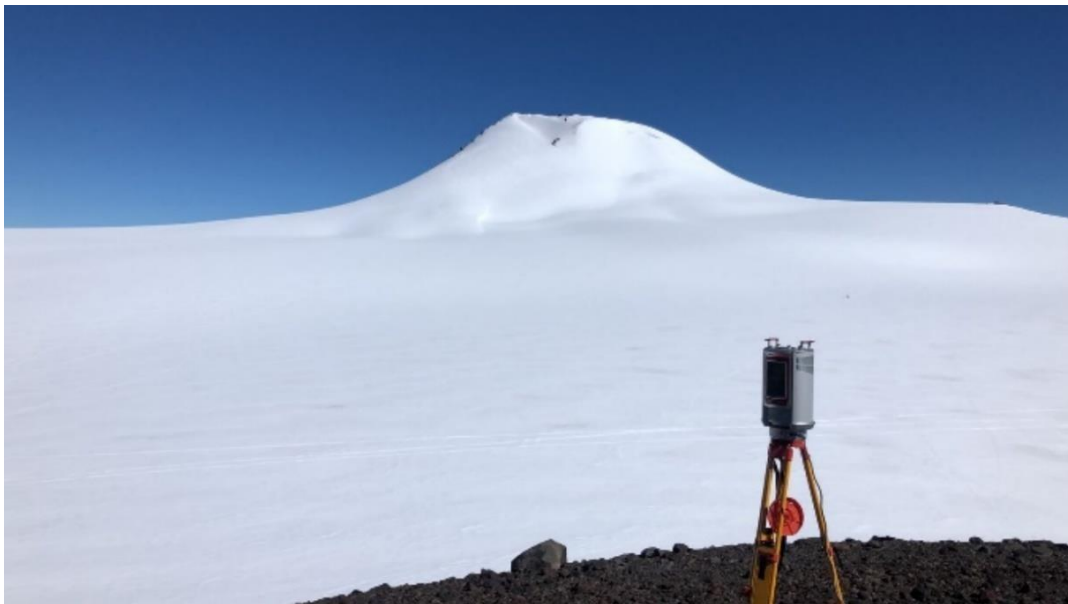


Figura A I-G. Instrumento LiDAR terrestre.

Tabla A I-J. Medición de altura de balizas del glaciar Mocho abril 2022.

Baliza N°	Tipo baliza	Largo total baliza (cm)	Altura época anterior (B) (cm)	Altura original visita actual (C) (cm)	Altura modificada visita actual (cm)	Diferencia altura (B-C) (cm)	Tipo sup.	Comentario
B08	PVC	1050	84	223	223	-139	hielo	
B10	PVC	1050	6	188	188	-182	hielo	
B11	PVC	1200	-9	183	183	-192	hielo	
B12	PVC	1300	718	910	160	-192	hielo	
B13	PVC	1050	89	415	415	-	hielo	Sector con grietas
B14	PVC	1050	36	194	194	-158	hielo	
B15	PVC	1050	56	173	172	-117	hielo	
B17	PVC	1050	36	-	203	-	hielo	
B18	PVC	1050	17	190	190	-173	hielo	
B19	PVC	1050	92	223	211	-131	nieve	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla A I-K. Medición de densidad de nieve en B19 con muestreador metálico tipo cuña, abril 2022.

Profundidad (cm)	Peso muestra (g)	Volumen (cm ³)	Densidad (g/cm ³)	Densidad (%)
0-10	147	250	0,588	58,8

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO II

Anexos digitales

Nombre y estructura de carpetas.

Se hacen entrega de 11 carpetas con diversos archivos ligado a cada objetivo.

Objetivo 1: Objetivo_1:

Sistema_Balizas: 1 archivo .SHP que contiene la distribución espacial de las balizas

Objetivo 2 y 6: Objetivo_6:

Noviembre_2021:

Balizas_Estatico_GNSS: 1 archivo .SHP que contiene las mediciones de las balizas mediante GNSS, método estático.

GNSS: Archivos GNSS formato Rinex .21P, .21O y archivos procesados por fecha.

Diciembre_2021:

Balizas_Estatico_GNSS: 1 archivo .SHP que contiene las mediciones de las balizas mediante GNSS, método estático.

GNSS: Archivos GNSS formato Rinex .21P, .21O y archivos procesados por fecha.

PPP_Base: 1 archivo .TXT que contiene las coordenadas de la base y un archivo .PDF con el certificado emitido por el sistema.

Febrero_2022:

Balizas_Estatico_GNSS: 1 archivo .SHP que contiene las mediciones de las balizas mediante GNSS, método estático.

GNSS: Archivos GNSS formato Rinex .21P, .21O y archivos procesados por fecha.

Abril_2022:

Balizas_Estatico_GNSS: 1 archivo .SHP que contiene las mediciones de las balizas mediante GNSS, método estático.

GNSS: Archivos GNSS formato Rinex .21P, .21O y archivos procesados por fecha.

Objetivo 3: Objetivo_3: Apoyo logístico para realizar levantamiento LiDAR en el mes de octubre.

Objetivo 4: Objetivo_4:

Datos_GPR_20211008: 1 archivo .RAR que contiene el levantamiento de GPR.

GPR: 1 archivo .SHP que contiene los datos finales y procesados del GPR.

GPR_Interpolado: 1 archivo .TIFF que contiene la interpolación de los datos GPR .SHP, mediante IDW para la cuenca SO Glaciar Mocho.

Objetivo 5: Objetivo_5: 1 archivo .CSV que contiene los datos de la estación meteorológica.

Objetivo 7: Objetivo_7: Apoyo logístico para realizar levantamiento LiDAR en el mes de abril.

Objetivo 8: Objetivo_8:

Anual: 6 archivos .TIFF que contiene los DEM'S, DEM's_Core (Co-registro de DEM's) y GMB (Balance de masa glaciológico) en metros y metros equivalentes en agua.

Estival: 8 archivos .TIFF que contiene los DEM'S y GMB (Balance de masa glaciológico) en metros y metros equivalentes en agua. Además de las densidades calculadas para el periodo estival.

Invernal: 4 archivos .TIFF que contiene los DEM'S y GMB (Balance de masa glaciológico) en metros y metros equivalentes en agua.

Comparacion_GPS_LiDAR: 3 archivos .SHP que contienen las comparaciones entre el GPS y LiDAR medidos en abril 2021, noviembre 2021 y abril 2022.

Objetivo 9: Objetivo_9:

Anual: 2 archivos .TIFF que contiene los balances de masa glaciológicos en metros equivalentes en agua.

Estival: 3 archivos .TIFF que contiene balance de masa glaciológicos en metros equivalentes en agua.

Invernal: 3 archivos .TIFF que contiene balance de masa glaciológicos en metros equivalentes en agua.

Corregidos: 4 archivos .TIFF que contiene el balance estival e invernal corregidos en metros y metros equivalentes en agua

Objetivo 10: Objetivo_10

Areas_SHP: 18 archivos .SHP que contienen la variación areal del glaciar Mocho desde 1976 hasta el 2022.

IMG: 2 imágenes .TIFF multiespectrales de noviembre 2021 y marzo 2022.

Objetivo 11: Objetivo_11: 1 archivo .PDF que contiene el informe final sobre el monitoreo del glaciar Mocho.

ANEXO III

Variable: Temperatura.

Tabla A III-A. Estadística de temperatura estación B18 sobre el glaciar.

Mes	Mínimo (°C)	Promedio (°C)	Máximo (°C)
Octubre	-8,55	1,34	11,59
Noviembre	-7,37	3,00	12,89
Diciembre	-4,80	6,45	17,49
Enero	-6,55	5,70	16,68
Febrero	-1,16	5,23	13,73
Marzo	-4,34	1,40	13,23

Fuente: Elaboración propia.

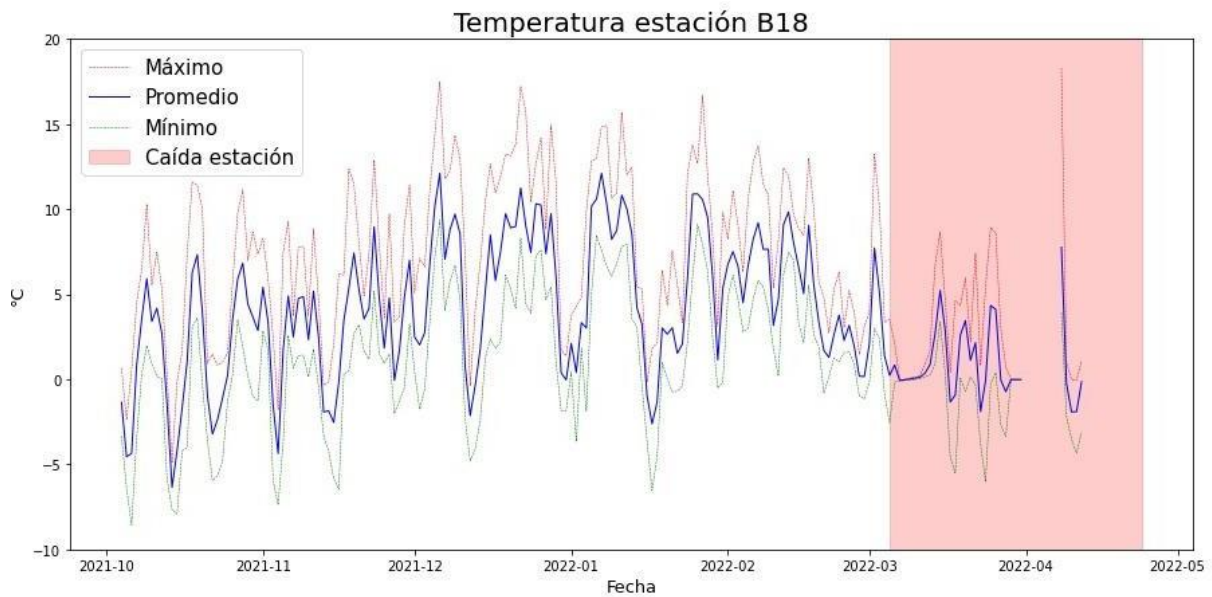


Figura A III-A. Temperatura a nivel diario, registrando máximo, mínimo y promedio.

Variable: Humedad relativa.

Tabla A III-B. Estadística de humedad relativa estación B18 sobre el glaciar.

Mes	Mínimo (%)	Promedio (%)	Máximo (%)
Octubre	2	64	100
Noviembre	4	70	100
Diciembre	7	59	100
Enero	3	71	100
Febrero	10	73	100
Marzo	21	87	100

Fuente: Elaboración propia.

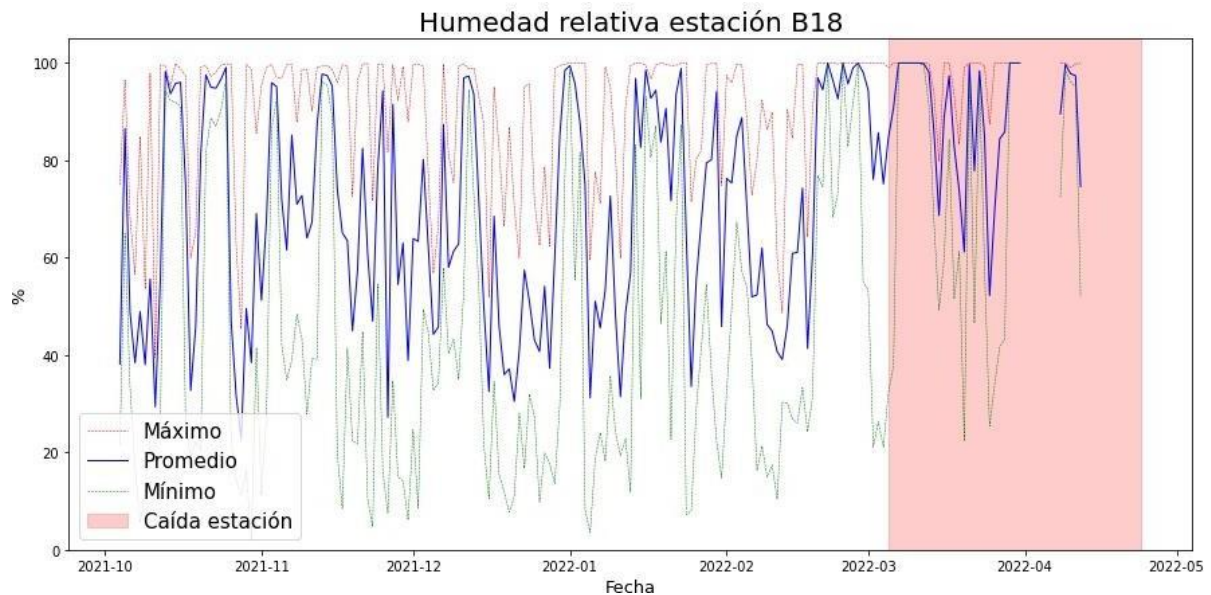


Figura A III-B. humedad relativa a nivel diario, registrando máximo, mínimo y promedio.

Variable: Radiación de onda corta.

Tabla A III-C. Estadística de radiación de onda corta estación B18 sobre el glaciar.

Mes	Radiación de onda corta (kW/m ²)
Octubre	0,26
Noviembre	0,29
Diciembre	0,34
Enero	0,29
Febrero	0,23
Marzo	-

Fuente: Elaboración propia.

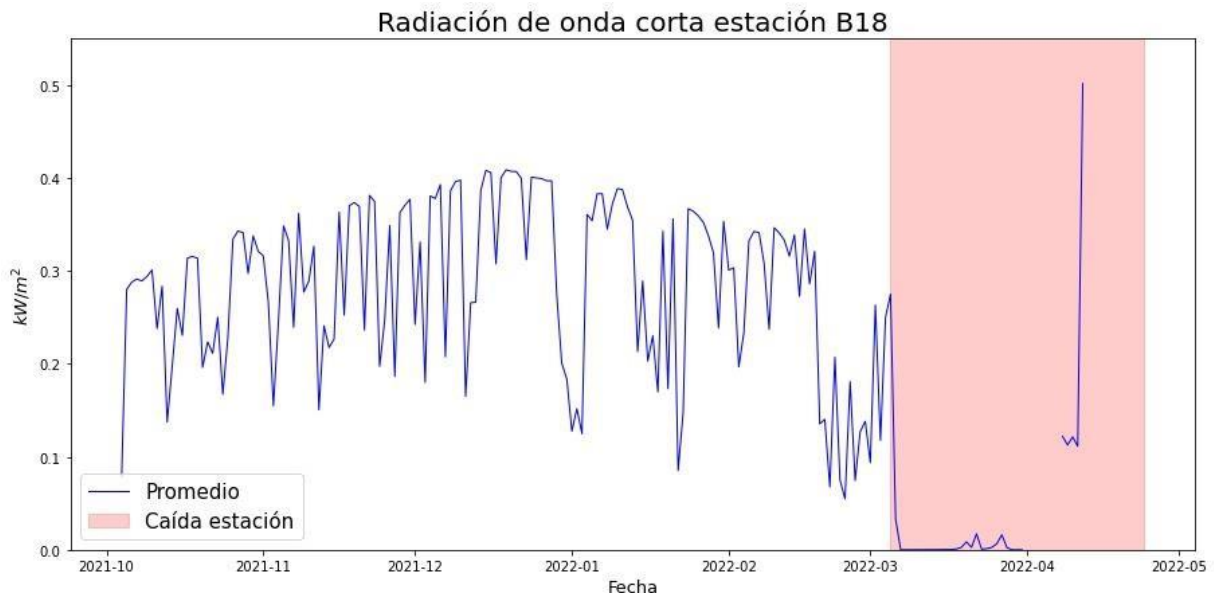


Figura A III-C. Radiación de onda corta promedio a nivel diario.

Variable: Velocidad y dirección del viento.

Tabla A III-D. Estadística de velocidad del viento estación B18 sobre el glaciar.

Mes	Mínimo (m/s)	Promedio (m/s)	Máximo (m/s)
Octubre	0	6,36	19,90
Noviembre	0	5,99	15,94
Diciembre	0	4,79	14,04
Enero	0	6,53	19,15
Febrero	0	5,10	15,87
Marzo	0	1,21	12,92

Fuente: Elaboración propia.

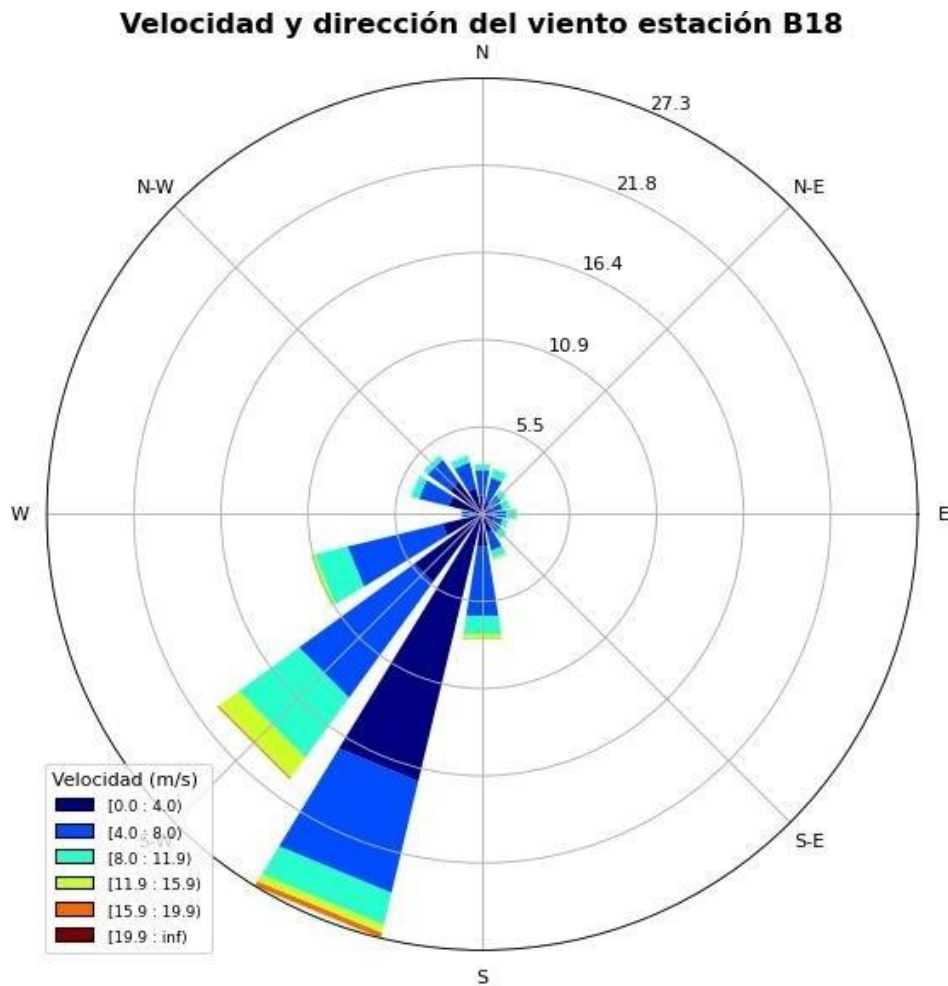


Figura A III-D. Velocidad y dirección del viento.

Variable: Presión atmosférica.

Tabla A III-D. Estadística de presión atmosférica estación B18 sobre el glaciar.

Mes	Presión atmosférica (mBa)
Octubre	512
Noviembre	514
Diciembre	516
Enero	513
Febrero	511
Marzo	501

Fuente: Elaboración propia.

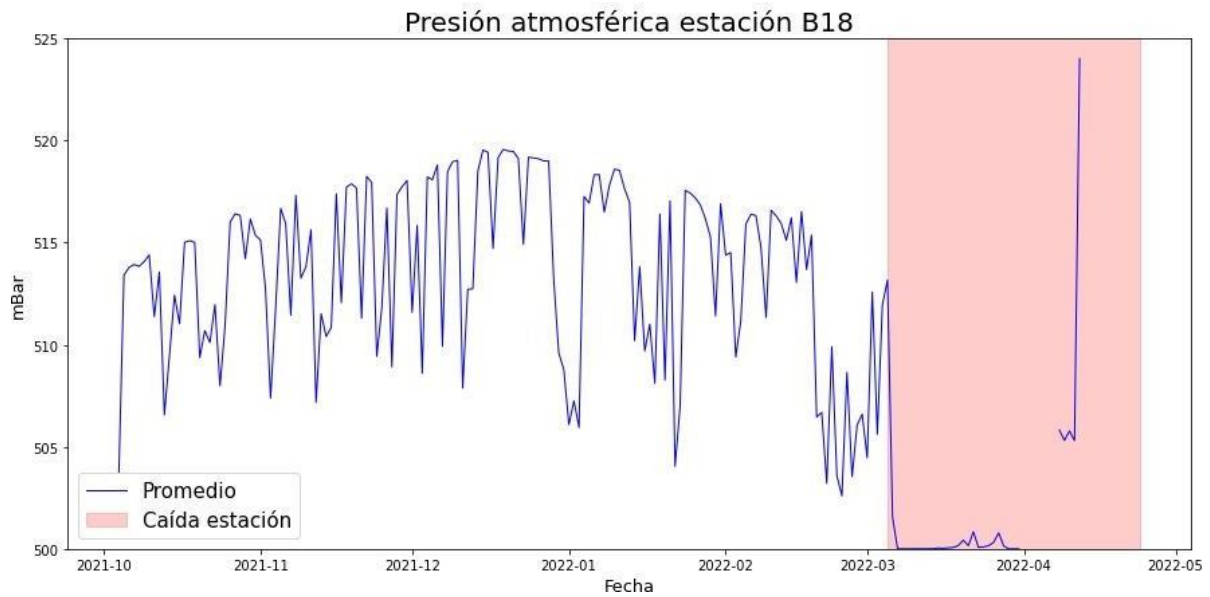


Figura A III-E. Presión atmosférica promedio a nivel diario.