GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS
UNIDAD DE GLACIOLOGÍA Y NIEVES

LÍNEA DE BASE GLACIOLÓGICA DEL SECTOR NORTE DE CAMPO DE HIELO SUR: GLACIARES JORGE MONTT, TÉMPANO Y O'HIGGINS

INFORME FINAL

REALIZADO POR:

CENTRO DE ESTUDIOS CIENTÍFICOS, CECs

S.I.T. N° 404

Santiago, septiembre 2016

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

Ministro de Obras Públicas

Ingeniero Sr. Alberto Undurraga V.

Director General de Aguas

Abogado Sr. Carlos Estévez V.

Jefe Unidad de Glaciología y Nieves

Dr. Gonzalo Barcaza S.

Inspector Fiscal

Ingeniero Sr. Diego González P.

CENTRO DE ESTUDIOS CIENTÍFICOS

Jefe de Proyecto

Dr. Andrés Rivera I.

Profesionales:

Ing. Rodrigo Zamora	Ing. Marco Gaete
MSc. Claudio Bravo	Ing. Gloria Galindo
MSc. Francisca Bown	Geog. Felipe Napoleoni
MSc. Sebastián Cisternas	Geog. Daniela Carrión
MSc. Thomas Loriaux	Geo. Jorge Correa
MSc. Jonathan Oberreuter	Ing. (e) Jorge Hernández
MSc. Sebastián Pulgar	Ing. (e) Cristian Inostroza
Dr. Tobías Kohoutek	Ing. (e) Alejandro Silva
Dr. Ryan Wilson	Ing. (e) Jonathan Garcés
Ing. José Andrés Uribe	MBA. Felipe Amtmann
Sr. Fernando Basilio	Sr. Carlos Foulloux

Resumen ejecutivo

(No se repiten referencias, tablas, figuras ni anexos, para facilitar la lectura de esta síntesis. Todos los datos y afirmaciones están debidamente referenciados en los capítulos respectivos)

Se presentan los resultados del proyecto "Línea Base Glaciológica del Sector Norte de Campo de Hielo Sur: Glaciares Jorge Montt, Témpano y O`Higgins" licitado por la Unidad de Glaciología y Nieves (UGN) de la Dirección General de Aguas (DGA) del Ministerio de Obras Públicas de Chile (MOP), el que fue ejecutado por el Laboratorio de Glaciología del Centro de Estudios Científicos (CECs) entre el 25 de febrero del 2014 y el 30 de septiembre del 2016, dándose cuenta de todas aquellas materias indicadas en las Bases Técnicas de la Licitación y sus modificaciones del 08 de octubre de 2015.

El área de estudio del proyecto se centra en la denominada Meseta Norte de Campo de Hielo Sur (CHS), entre los 48°S y 49° S, y entre las costas del Pacífico y el Lago O'Higgins.

El objetivo general del proyecto fue el realizar mediciones glaciológicas en la meseta (*plateau*) norte de CHS incluyendo las áreas acumulación y ablación de los glaciares en estudio, junto con implementar y mantener infraestructura de soporte para la realización de mediciones glaciológicas y meteorológicas comparadas entre las fachadas occidental y oriental del sector norte de CHS.

Los objetivos específicos del proyecto incluyeron una recopilación bibliográfica de los estudios recientes sobre el CHS, definiendo así una línea de base actual y caracterizando su comportamiento glaciar. Para ello, se solicitó; realizar mediciones de espesor de hielo; caracterizar el manto nival; mantener y revisar las estaciones meteorológicas fijas ubicadas en los glaciares Témpano y O`Higgins; implementar una nueva red de

estaciones en las cercanías del Glaciar Jorge Montt; analizar variables meteorológicas en el entorno de las fachadas occidentales y orientales del CHS; determinar velocidades del hielo; medir cambios de elevación del sector norte de CHS; medir y caracterizar cambios de altura de nivel de agua y su relación con la dinámica glaciar; y finalmente, instalar y habilitar tres estaciones glaciológicas en la meseta norte de CHS.

El proyecto se desarrolló sin dificultades mayores, de acuerdo a la planificación realizada para cada una de las actividades señaladas en las bases técnicas, destacando que pese al desafío logístico y operativo que representó la ejecución de actividades científicas complejas en un territorio particularmente extremo en cuanto a sus condiciones meteorológicas y logísticas, las que limitaron y condicionaron la oportunidad de operar en la zona, finalmente el proyecto fue ejecutado de manera segura, exitosa, sin incidentes, destacando el cumplimiento de las tareas y labores asumidas por el equipo de profesionales y técnicos del CECs, en coordinación con las respectivas contrapartes administrativas y técnicas de la DGA.

Análisis integrado

La mayor parte de los glaciares de Chile están en la región Patagonia, en particular en CHS, compartido entre Chile y Argentina, que junto a sus cuencas aledañas, tienen un área total de hielo de 14151 km^2 distribuidos en 6310 glaciares. Se ha estimado que entre el año 2003 y 2011 se perdieron 29 (±10) Gt de hielo por año, una cifra sólo superada por Alaska y otras regiones del Ártico. Estas pérdidas volumétricas de hielo se vienen produciendo hace varias décadas, contribuyendo significativamente al aumento global del nivel del mar.

CHS es una masa de hielo temperada que se extiende por unos 350 km norte-sur distribuidos en cerca de 48 cuencas glaciares cuyas lenguas

terminales fluyen hacia el oeste (y norte en el caso del Jorge Montt), donde en su gran mayoría produce témpanos en fiordos, y hacia el este, donde una gran parte produce témpanos en lagos pedemontanos. Las alturas máximas de la topografía en CHS llegan a 3600 m snm en el Volcán Lautaro, pero hacia el norte bajan hasta el *plateau* principal con alturas promedio de 1500 m snm aproximadamente, constituyéndose en la principal área de acumulación de los glaciares O'Higgins, Témpano y Jorge Montt. Esta topografía ha sido mapeada en detalle durante este proyecto con el sistema CAMS (LiDAR aerotransportado del CECs), incluyéndose secciones que han tenido muchos cambios, por lo que requerían ser actualizadas.

Esta configuración del territorio favorece la generación de fuertes contrastes climáticos longitudinales, entre las márgenes occidental y oriental, y verticales, lo que ha sido verificado con las estaciones meteorológicas implementadas durante este proyecto y por los datos obtenidos de estaciones permanentes, algunas de las cuales fueron mantenidas y mejoradas durante este proyecto.

Estos contrastes climáticos se evidencian por una transición de precipitaciones desde algunos metros por año en el oeste, hasta pocos cientos de mm en el este. Con vientos predominantes del Oeste en el margen oriental, con velocidades crecientes hacia el Este, una humedad relativa muy alta en el Oeste, pero muy baja en el Este, alta cobertura nubosa en el Oeste versus el Este y temperaturas del aire sobre 0ºC en toda la periferia, pero a iguales alturas, valores más altos en el margen oriental. Respecto de los gradientes verticales, destaca el importante incremento de precipitaciones y humedad relativa entre el océano y el *plateau* central, para luego descender bruscamente hacia el Este, o las temperaturas del aire, que tienen gradientes de 7.1 en el margen

occidental y de 7.6 ºC/km en el oriental (muy superiores a los 6 a 6.5ºC/km en otras regiones del país). No obstante estos fuertes gradientes térmicos, la parte alta y central del *plateau* tienen temperaturas promedio positivas entre noviembre y abril, mientras que de mayo a octubre son negativas, con un mínimo de -4ºC en junio para la estación Greve, pero incluso en 2016, el periodo invernal frío mostró numerosos episodios que duraron varios días con temperaturas positivas. En otras palabras, hubo derretimiento prácticamente todo el año en la zona de acumulación, aunque con montos bajos en invierno.

Considerando estos contrastes y gradientes, se concluye que CHS tiene ambientes muy disímiles, lo que en gran parte explicaría el comportamiento del hielo. Sin embargo, como se verá más adelante, los glaciares no responden linealmente al clima de la región.

Además de los contrastes climáticos antes mencionados, en las últimas décadas se ha configurado un escenario de cambios climáticos con aumentos moderados de la temperatura del aire sobre CHS, en especial en los meses de verano- cuando hay mayor derretimiento- y en otoño, generándose un cambio de precipitaciones sólidas a líquidas afectando negativamente el balance de masa de la zona. En cuanto a las precipitaciones, no existe un indicio claro de cambio decadal, registrándose señales contradictorias entre estaciones y modelos, por lo que sería necesario contar con mayor cobertura espacial de datos y registros más prolongados para la determinación de variaciones en las precipitaciones.

En cuanto a la variabilidad interanual, esta zona se encuentra influenciada por las condiciones a escala sinóptica y la circulación del océano en el Pacífico Sur, con patrones de circulación sinópticas que responden a modos y patrones climáticos de gran escala que determinan la variabilidad interanual de la precipitación y la temperatura. Específicamente en CHS, el

Modo Anular del Sur (SAM) tiene un impacto significativo en las temperaturas y precipitaciones, donde SAM positivos (negativos) se asocian a mayores (menores) temperaturas, y a una intensificación (debilitamiento) de los vientos del Oeste lo que genera un aumento (disminución) de las precipitaciones en el área de estudio. Esto es particularmente de interés, ya que se ha detectado una tendencia a índices positivos del índice SAM durante la segunda mitad del Siglo XX y comienzos del XXI lo que indicaría aumentos de temperaturas y aumento de precipitaciones, que potencialmente podrían afectar las características climatológicas y, por ende, la criósfera de la zona, al impulsar una migración en altura de la línea de nieve, generándose una disminución de precipitación sólida en las zonas de acumulación, y una mayor precipitación líquida en las de ablación, lo que aumentaría el derretimiento.

En este contexto de cambios climáticos, se ha documentado en las últimas décadas un proceso creciente de deglaciación de CHS, con la mayoría de glaciares experimentando fuertes retrocesos, y en limitados casos con avances, llegando a máximos holocénicos. Estos retrocesos han sido acompañados por una pérdida volumétrica importante, en particular en las partes bajas donde hay un fuerte derretimiento, sin embargo en las partes altas se ha modelado que los cambios no son tan fuertes y que incluso habría un balance positivo en las últimas décadas. Esto se ha confirmado con los datos de topografía superficial generados en este proyecto, que al ser comparados con datos previos, indican fuertes adelgazamiento en las partes bajas y estabilidad en las altas. Este contraste entre zonas de acumulación relativamente estables y con eventual engrosamiento, versus zonas bajas con fuertes retrocesos y adelgazamientos, implica que el comportamiento de CHS está modulado por factores no sólo climáticos,

entre los cuales debe destacarse la producción de témpanos (*calving*), que constituye un factor predominante de pérdida de masa en la mayoría de los glaciares de CHS. El *calving* está controlado por factores locales existentes en la zona de desprendimiento de hielo, en particular la batimetría de los cuerpos de agua asociados, el espesor del hielo, la temperatura del agua y sus cambios de nivel. Para explicar el proceso de *calving* y sus cambios en el tiempo, se ha elaborado un modelo simple que define un ciclo de avances y retrocesos, llamado TWC (por sus siglas en inglés de *Tidewater Calving Cycle*), el que es gatillado por cambios climáticos y su variabilidad de mediano plazo, pero que se expresa en este tipo de cuerpos de hielo en forma diferencial, dependiendo de la flotabilidad potencial del hielo en presencia de contacto hielo-agua, en especial, en aguas profundas.

En este proyecto se estudiaron los procesos y ciclo de TWC en tres glaciares de *calving* existentes en la parte norte del CHS, representativos de sus dos márgenes principales occidental (con fiordos al Oeste y Norte) versus oriental (con grandes lagos pedemontanos al Este). Estos glaciares presentan todas las fases del TWC, con excepción de la fase de avance, que en CHS sólo es experimentada por el glaciar Pío XI.

Los tres glaciares estudiados en detalle durante el proyecto (Jorge Montt, Témpano y O'Higgins), presentan la misma tendencia de pérdida de masa en décadas recientes, sin embargo, sus comportamientos históricos han tenido grandes diferencias;

- El Glaciar Jorge Montt, que termina en un fiordo homónimo, ha tenido el mayor retroceso histórico en Chile, resultando en la formación de un nuevo fiordo de 24 km^2 entre 1975 y 2016. Este glaciar tiene evidencias de aceleramiento del flujo del hielo en décadas recientes, con velocidades actuales de más de 18 m/d,

adelgazamientos de hasta 10 m/a promedio de las partes bajas entre el año 2000 y 2015, pero sin cambios significativos en las zonas de acumulación, retrocesos recientes de más de 400 m/a y una alta tasa de *calving* que llega a 2.7 km^3/a promedio en el periodo 2014-2016, lo que se explica en gran medida, porque el glaciar termina en un fiordo cuyas profundidades alcanzan cerca de 400 m de profundidad con forma de valle en U. Este glaciar representa la fase de inestabilidad y colapso del TWC.

- El Glaciar Témpano, que también desprende témpanos en su fiordo homónimo, donde las profundidades máximas son del orden de 100 m y con una forma más bien rectangular, lo que ha dado mayor estabilidad a su lengua frontal, confirmado por una expansión del fiordo de sólo 7 km^2 entre 1945 y 2016. No obstante lo anterior, este glaciar ha tenido un adelgazamiento con valores promedio de 2 a 2.5 m/a en las partes bajas, mientras que las partes altas no muestran cambios significativos. Además, se ha detectado un desaceleramiento del hielo, con valores actuales de aproximadamente 4 m/d y un retroceso frontal moderado de unos 143 m/a entre 2014 y 2016, lo que combinado con otros parámetros determina una tasa de flujo de 0.19 km^3/a, considerada baja al compararla con los otros glaciares estudiados. Este glaciar podría representar la fase previa de una desestabilización y colapso del TWC.
- El tercer glaciar estudiado en este proyecto es el O'Higgins, que produce témpanos en el lago homónimo, cuya profundidad es una de las más altas de Chile (más de 800 m), lo que explica en gran parte el fuerte retroceso que experimentó entre 1945 y 1995, cuando el lago O'Higgins se expandió en 41 km^2. Sin embargo, desde

mediados de los 90's y hasta el presente, el glaciar se ha estabilizado en un fiordo con profundidades máximas de aproximadamente 450 m, con una sección batimétrica cercana al frente actual de profundidades de forma rectangular, lo que ha favorecido que se mantenga la posición frontal actual con oscilaciones de pocas decenas de metros por año (-31 m/a entre el 2014 y 2016), y cambios de elevación en las partes bajas que pasaron de -3.5 m/a entre 1975 y 2000 a cerca de 0 m/a entre el 2000 y 2015. Esta estabilización se ha visto reforzada con un progresivo desaceleramiento, alcanzando velocidades de 9 m/d en la actualidad, lo que combinado a los otros parámetros, determinan un flujo de *calving* de 1.5 km^3/a para el periodo 2014-2016. Este glaciar representa la fase post colapso y estabilidad del TWC.

Al comparar estas características dinámicas con el análisis de los sensores de presión de agua instalados durante la ejecución del proyecto, se pudo constatar que en el Glaciar Jorge Montt no se verificaron relaciones entre mareas (muy bien retratadas en los datos obtenidos) y la dinámica del hielo, debido a que el flujo de *calving* es muy alto y semi caótico, lo que supera cualquier efecto posible de mareas que en la zona alcanzaron una amplitud máxima (en sicigias) de 2.7 m. No obstante lo anterior, se comprobó que el glaciar tiene una tasa de *calving* mayor en el verano, en consonancia con el periodo de mayor derretimiento y por ende deslizamiento basal.

En el Glaciar Témpano tampoco se detectó un efecto de mareas, y cuando se extrajo la señal sinusoidal de ellas, los residuales no mostraron una relación con el flujo de hielo. En este caso, sería necesario tener una serie más completa de velocidades y a una escala temporal más frecuente para verificar esta relación.

En el caso del Glaciar O'Higgins, los sensores de presión de agua instalados en el lago homónimo lograron retratar bien el ciclo anual de variaciones lacustres con una amplitud anual máxima de 3.8 m, con máximos en abril y mínimos en octubre, donde no se detectó una ciclicidad diaria, la que de haber existido, se hubiese visto totalmente enmascarada por el ruido en los datos capturados por el sensor, los que fueron generados por el oleaje y la presencia de bloques de hielo. Este problema se podría subsanar en futuras instalaciones de sensores de presión de agua en sitios más alejados del frente y mejor protegidos de hielo en deriva. No obstante lo anterior, en este glaciar también se detectó un aumento del *calving* en verano, cuando incluso se han detectado eventos subacuáticos fuertes y formación de *notches* o hendiduras por derretimiento en la base de la pared del hielo en contacto con el agua, las que producen inestabilidad y mayor desprendimiento vertical.

Estas dinámicas recientes descritas para los glaciares estudiados, en particular sus retrocesos, deberían mantenerse en el futuro, en consonancia con las tendencias de cambios climáticos que se han modelado para las próximas décadas, que de acuerdo a todos los modelos disponibles, pronostican mayores temperaturas atmosféricas en la región, lo que generaría mayor derretimiento, precipitaciones líquidas a mayores alturas y balances de masa más negativos. Sin perjuicio de ello, las respuestas específicas de cada glaciar variarán dependiendo de las características locales de cada cuerpo de hielo, especialmente debido a que son glaciares de *calving*, donde el espesor de hielo aguas arriba del frente terminal actual es fundamental. En las últimas décadas se ha constatado que topografías subglaciales cada vez más profundas aguas arriba de los frentes glaciares (topografía subglacial inversa), han provocado aceleramiento de retrocesos y colapsos de lenguas terminales,

como los observados en el Glaciar Jorge Montt desde 1975 hasta el presente, y en el Glaciar O'Higgins entre el año 1945 y 1995. Por el contrario, cuando los espesores de hielo disminuyen aguas arriba de los frentes terminales (topografía subglacial directa), el retroceso se ve aminorado como en el Glaciar Témpano en las últimas décadas, y en algunos casos se alcanza una relativa estabilidad, tal como en el Glaciar O'Higgins desde 1995 hasta el presente.

Para dilucidar este posible comportamiento futuro, es necesario contar con datos de espesor de hielo. Durante la ejecución de este proyecto se realizaron levantamientos de topografía subglacial a lo largo de numerosos perfiles que cubren la mayor parte de CHS. Aun cuando la condición temperada del hielo en la región limita la capacidad de penetración mediante los sistemas de radar disponibles, se logró detectar un espesor máximo de 581 m en la zona de acumulación del Glaciar Jorge Montt.

Con los datos generados en este proyecto (que son en general consistentes con modelos existentes), se puede concluir que aguas arriba del frente actual del Glaciar Jorge Montt existe una topografía subglacial cercana al nivel del mar, la que se extiende desde el frente hasta unos 3 km de distancia, lo que permite suponer que el retroceso actual debería disminuir y alcanzar cierta estabilidad. Adicionalmente, entre 3 y 6 km de distancia aguas arriba del frente actual, la topografía subglacial vuelve a ser inversa (por debajo del nivel del mar), lo que augura, en el caso de que el frente llegue a ese sector, que haya un nuevo ciclo de fuertes retrocesos y colapso. En el caso del Glaciar O'Higgins, no se detectó fondo subglacial cerca del frente, pero considerando modelos topográficos subglaciales disponibles, se estima que la topografía sería directa por al menos unos 10 km aguas arriba del frente actual, lo que seguiría dándole estabilidad al hielo incluso en contextos climáticos adversos. En el caso del

Glaciar Témpano, se estima que con los modelos disponibles, la topografía subglacial sería ligeramente directa en los primeros kilómetros, para luego ser moderadamente inversa aguas arriba. En este contexto, se espera que este glaciar siga retrocediendo a tasas bajas y no experimente colapsos sustanciales en el corto plazo. La materialización de estos cambios glaciares futuros dependerá de muchos factores, por lo que la conclusión fundamental de este proyecto, es que hay que seguir midiendo la zona, mejorando las redes de monitoreo meteorológico existentes para obtener series climáticas más representativas, aumentando así las mediciones de topografía superficial en las partes altas y de topografía subglacial cerca de los frentes actuales.

Precisamente para este objetivo es que en este proyecto se implementó una nueva red de estaciones en la periferia de CHS yse realizó el mantenimiento de las dos estaciones permanentes previamente instaladas por la DGA. Además de las estaciones antes mencionadas, en el *plateau* se instalaron tres nuevas estaciones meteorológicas con dos niveles de altura, cada uno con numerosos sensores meteorológicos y tres torres nivométricas instaladas aproximadamente a 1178-1415 m snm. En estas torres se midió la temperatura del aire y altura de nieve con sensores *Sonic Range* y se excavaron varios pozos estratigráficos con lo que se caracterizó la densidad del manto nival acumulado, la que mostró valores desde 300 a 600 kg/m^3, intercalados con numerosos lentes de hielo que evidencian frecuentes procesos de recongelación. Estos datos junto a las mediciones meteorológicas de las estaciones cercanas, permitieron estimar el balance de masa anual del sector que alcanzó valores entre 2.8 m eq a. (a 1415 m sm) y 0.2 m eq a. (a 1294 m snm) para el año hidrológico 2015-2016. Este balance incluyó una estimación de derretimiento en la zona, que resultó en un factor de grados días de 7 mm eq. a. por grado

Celsius positivo acumulado por día, factor conocido como DDF (por su sigla en inglés *Degree Day Factor)* y una ablación acumulada anual de -2.8 m eq. a. a 1415 m snm, lo que sorprende considerando que se trata de la zona de acumulación de CHS. Estos valores, junto a un modelo digital de terreno y los respectivos gradientes altimétricos de la región, permitieron además obtener el derretimiento total por mes para el periodo de verano en todos los glaciares aquí estudiados, destacándose valores acumulados máximos de 12 m eq. a. en las partes bajas de los tres glaciares.

En la zona de acumulación donde se instalaron las torres nivométricas, se midió además la estructura interna del manto de nieve/neviza superficial (hasta 20 m) con sistemas de radar, lo que permitió detectar isócronas o capas de igual edad, que fueron asignadas a acumulaciones anuales de nieve. Esto permitió determinar el balance de masa del sector representativo del *plateau* a 1294 m snm, para los últimos 20 años aproximadamente. Para ello, se utilizaron las densidades medidas en los pozos estratigráficos y los datos de balance de masa existentes en la zona, en particular un testigo de hielo somero extraído desde el Glaciar Pío XI a 2600 m snm. Con ello se pudo obtener valores de acumulación que fluctuaron entre 0.2 y 0.5 m eq. a., entre 2014/15 y 1994/95, respectivamente, sin detectarse una tendencia en la serie obtenida, pero una buena correspondencia con Pío XI en el periodo común, aunque con una diferencia de un orden de magnitud, lo que es comprensible si se considera el desnivel altimétrico de 1300 m existente entre ambos puntos.

Para llevar a cabo todos estos estudios, hubo que realizar un esfuerzo inédito, de gran trabajo logístico y humano de más de 20 profesionales y técnicos, que implicó el uso intensivo de 2 helicópteros, 2 camiones y sus ramplas respectivas por cada campaña, 2 camionetas por más de 30 días por cada campaña.

Este despliegue de personas y equipos fue especialmente necesario para la instalación de 3 estaciones glaciológicas en la parte alta de CHS, en *nunataks* o afloramientos rocosos rodeados de hielo, que debieron ser especialmente acondicionados para estos efectos. Estas estaciones son espacios de trabajo, alojamiento, almacenamiento y baño para el personal científico y técnico que requiera acceder al *plateau* central de CHS. Cada estación glaciológica está compuesta por dos módulos anclados a roca, compuestos por bases metálicas modulares y paneles de fibra de vidrio ensamblados de forma tal que generan un espacio de 12 y 18 m^2 respectivamente, los que son sellados y aislados generando áreas interiores temperadas y secas para albergar cómodamente a 6 personas. Además, se incluyó en cada estación glaciológica el menaje necesario para cocinar y permanecer por largos periodos de tiempo, en condiciones de aislamiento sin apoyo externo. En cada estación se instaló un baño seco con todos los accesorios y materiales para el manejo de residuos y la limpieza e higiene de la estación y personas. Estos módulos fueron acondicionados con un sistema eléctrico, el cual considera luces *led* y enchufes, alimentado por baterías y paneles solares conectados por sistemas de control e inversión. Al finalizar la última campaña de terreno, cada estación quedó con alimentos no perecibles y equipos para que 6 personas puedan permanecer 10 días.

En la Estación Glaciológica Greve se instalaron además 4 garajes diseñados y construidos por el CECs para el resguardo de igual número de motos de nieve, equipos de última generación que fueron adquiridos en este proyecto, acondicionadas por el CECs para travesías en ambientes glaciares, utilizadas en cada campaña de terreno donde se transitó y midió decenas de kilómetros, para finalmente, ser bajadas a Coyhaique al cierre del proyecto, tal como lo solicitó el mandante.

De igual manera, durante la ejecución del proyecto se realizaron las actividades de extensión requeridas en las bases de licitación, ejecutándose dos talleres de difusión y, el primero en dependencias de la DGA en Santiago, y el segundo, en dependencias del MOP en Coihaique, donde asistieron más de 70 personas.

Con la experiencia ganada y los resultados obtenidos, culmina este Informe Final Borrador con una serie de recomendaciones para mejorar diversos aspectos de este tipo de investigaciones, presentándose además una propuesta de continuidad de estudios y trabajos, conducentes a mejorar el acceso y conocimiento de CHS.

En síntesis, se estima que este proyecto ha finalizado de manera muy exitosa, con un gran volumen de datos capturados, una infraestructura instalada de gran calidad, una red de mediciones meteorológicas permanentes transmitiendo datos en tiempo real y un análisis integrado de gran valor científico, que constituyen una robusta línea de base glaciológica.

Índice

Resumen ejecutivo i

1 Introducción 1

2 Estudio climatológico de las fachadas oriental y occidental de la zona norte de Campo de Hielo Sur 5

2.1 Resumen 5

2.2 Introducción 6

2.3 Objetivos 7

2.3.1 Objetivo general 7

2.3.2 Objetivos específicos 7

2.4 Materiales y Métodos 8

2.4.1 Datos climatológicos previos 8

2.4.2 Datos climatológicos obtenidos en Campo de Hielo Sur. 9

2.5 Análisis Climatológico de CHS 14

2.5.1 Tendencias climáticas: antecedentes y datos de modelos 19

2.5.2 Tendencias climáticas: observaciones 23

2.6 Análisis Meteorológico 26

2.6.1 Análisis de estaciones meteorológicas periferia 26

2.6.1.1 Temperatura del aire 26

2.6.1.2 Humedad relativa 29

2.6.1.3 Presión atmosférica 31

2.6.1.4 Velocidad y dirección del viento 32

2.6.1.5 Radiación solar incidente de onda corta y radiación incidente de onda larga 33

2.6.1.6 Precipitaciones 37
2.6.2 Análisis de estaciones meteorológicas meseta 39
2.6.2.1 Temperatura del aire 39
2.6.2.2 Humedad relativa 41
2.6.2.3 Presión atmosférica 42
2.6.2.4 Velocidad y dirección del viento 44
2.6.2.5 Radiación solar incidente de onda corta y radiación incidente de onda larga 47
2.6.3 Análisis comparativo entre la fachada oriental y occidental de CHS 50
2.6.4 Estimación del derretimiento en CHS 55
2.7 Discusión y conclusiones 64
3 Análisis glaciológico de fachadas oriental y occidental de CHS 67
3.1 Resumen 67
3.2 Introducción 68
3.3 Objetivos 75
3.3.1 General 75
3.3.2 Específicos 75
3.4 Materiales y métodos 76
3.4.1 Delimitación de contornos de glaciares y sus cambios 76
3.4.2 Velocidades de hielo mediante técnicas de *feature tracking* 76
3.4.3 Flujo de *calving* 86
3.5 Resultados 87
3.5.1 Fachada occidental 87

3.5.1.1 Cambios frontales 87
3.5.1.2 Velocidades de hielo 96
3.5.1.3 Flujo de calving 102
3.5.2 Fachada oriental 104
3.5.2.1 Variaciones frontales 104
3.5.2.2 Velocidades de hielo 107
3.5.2.3 Flujo de calving 109
3.6 Discusión y conclusiones 110
9 (2014-2016) 112
4 Análisis de las variaciones de la columna de agua 115
4.1 Resumen 115
4.2 Introducción 115
4.3 Objetivos 116
4.3.1 General 116
4.3.2 Específicos 116
4.4 Materiales y métodos 117
4.4.1 Batimetría 117
4.4.2 Mediciones de nivel de agua y análisis espectrales 118
4.5 Resultados 121
4.5.1 Fiordos 121
4.5.2 Lago O'Higgins 129
4.6 Discusión y conclusiones 133
5 Estudio de los cambios de elevación de los glaciares del sector norte de Campo de Hielo Sur 135

5.1 Resumen 135
5.2 Introducción 135
5.3 Objetivos 136
5.3.1 Objetivo general 136
5.3.2 Objetivos específicos 136
5.4 Materiales y métodos 137
5.4.1 Estudios pre-existentes 137
5.4.2 Datos Topográficos. 137
5.4.3 Componentes y operación del sistema aerotransportado LiDAR − CAMs 140
5.4.4 Post-procesamiento de datos 141
5.4.5 Campaña de agosto de 2014 145
5.4.6 Datos obtenidos durante el año 2015 149
5.4.7 Comparación entre datos topográficos 151
5.5 Resultados 154
5.6 Discusión y conclusiones 160
6 Estudio de espesor de hielo en la zona norte de Campo de Hielo Sur 162
6.1 Resumen 162
6.2 Introducción 163
6.3 Objetivos 165
6.4 Materiales y métodos 165
6.4.1 Instrumentación 165
6.4.1.1 Sistema de radar para acumulación de nieve 165
6.4.1.2 Sistema de radar para espesor de hielo 166

6.4.2 Captura de datos 170
6.4.2.1 Medición de acumulación de nieve 170
6.4.2.2 Medición de espesor de hielo 171
6.4.3 Procesamiento de datos 174
6.4.3.1 Procesamiento de datos de radar para acumulación de nieve 174
6.4.3.2 Procesamiento de datos de radar para espesor de hielo. 175
6.5 Resultados 179
6.5.1 Acumulación de nieve 179
6.5.2 Espesor de hielo 182
6.5.2.1 Perfil longitudinal L1-L43 185
6.5.2.2 Perfil transversal L2-L3 190
6.5.2.3 Perfil transversal L4-L5 192
6.5.2.4 Perfil transversal L19-L20 195
6.5.2.5 Perfil transversal L21-L22 197
6.5.2.6 Perfil transversal L23-L24 200
6.5.2.7 Perfil transversal L29-L30 202
6.5.2.8 Perfil transversal L36-L38 203
6.5.2.9 Perfil transversal L39-L40 205
6.5.2.10 Perfil transversal L41-L42 207
6.5.2.11 Perfil longitudinal L56-L57 209
6.6 Comparación entre los perfiles analizados 211
6.7 Comparación con datos de otros estudios 212
6.7.1 Glaciar Jorge Montt 216

6.7.2 Glaciar O'Higgins 217
6.7.3 Glaciar Témpano 217
6.8 Discusión y conclusiones 218
7 Caracterización del manto nival y estimación de acumulación anual 221
7.1 Resumen 221
7.2 Introducción 221
7.3 Objetivos 222
7.3.1 Objetivo General 222
7.3.2 Objetivos específicos 222
7.4 Materiales y métodos 223
7.4.1 Torres Nivométricas 223
7.4.2 Pozos estratigráficos 228
7.4.3 Estaciones AWS 229
7.4.4 Radar 230
7.5 Resultados 230
7.5.1 Estimación de acumulación para el periodo estival 230
7.5.1.1 Pozos estratigráficos 230
7.5.1.2 Torre nivométrica 1 235
7.5.1.3 Torre nivométrica 2 240
7.5.2 Estimación de acumulación promedio para el periodo de invierno 2015 251
7.5.2.1 Torre nivométrica 1 252
7.5.2.2 Torre nivométrica 2 252

7.5.3 Estimación de acumulación promedio para el periodo 2015-2016 253

7.5.4 Balance de masa interanual con radar 255

7.5.5 Velocidades de hielo 260

7.6 Discusión y conclusiones 261

8 Implementación y monitoreo hidro-meteorológico en los Glaciares de estudio 267

8.1 Resumen 267

8.2 Instalaciones y mantenimientos de las estaciones hidro-meteorológicas 267

8.2.1 Glaciar Jorge Montt 267

8.2.2 Glaciar Témpano 273

8.2.3 Glaciar O'Higgins 278

8.3 Instalaciónes y mantenimientos de los sistemas de nivel de agua 282

8.3.1 Glaciar Jorge Montt 282

8.3.2 Glaciar Témpano 286

8.3.3 Glaciar O'Higgins 289

8.4 Instalaciónes y mantenimientos de los sistemas de monitoreo fotográfico 293

8.4.1 Glaciar Jorge Montt 293

8.4.2 Glaciar Témpano 296

8.4.3 Glaciar O'Higgins 300

8.5 Instalaciónes y mantenimientos de las estaciones meteorológicas en Meseta 305

8.5.1 Hielo sur en Glaciar Greve 305
8.5.2 Hielo sur en Glaciar Greve Nunatak Occidental 313
8.5.3 Hielo sur en Glaciar O'Higgins 320
9 Implementación de Estaciones Glaciológicas en la zona norte de Campo de Hielo Sur 327
9.1 Resumen 327
9.2 Definición de la ubicación de las Estaciones Glaciológicas 327
9.3 Caracterización geológica del terreno donde se ubican las estaciones glaciológicas 335
9.3.1 Estación Glaciológica Greve. 338
9.3.2 Estación Glaciológica Témpano. 339
9.3.3 Estación Glaciológica O'Higgins. 340
9.4 Diseño y construcción de las estaciones glaciológicas. 344
9.4.1 Base de soporte 344
9.4.2 Paramentos 345
9.4.3 Ventilación 345
9.4.4 Planos 346
9.4.4.1 Glaciar Greve 349
9.4.4.2 Glaciar Témpano 352
9.4.4.3 Glaciar O'Higgins 355
9.5 Instalación de la primera Estación Glaciológica en Meseta 358
9.6 Mantenimiento realizado a la Estación Glaciológica Greve 365
9.6.1 Primer mantenimiento (abril 2015) 365
9.6.2 Segundo mantenimiento (septiembre - octubre de 2015) ... 368

9.6.3 Tercer mantenimiento (junio – julio de 2016) 370
9.7 Instalación de la segunda Estación Glaciológica en Meseta..... 374
9.8 Mantenimiento realizado a la Estación Glaciológica Témpano ... 382
9.8.1 Primer mantenimiento (septiembre - octubre 2015) 382
9.8.2 Segundo mantenimiento (junio - julio 2016) 385
9.9 Instalación de la tercera Estación Glaciológica en Meseta..... 390
9.9.1 Primer mantenimiento (junio - julio 2016) 395
10 Recomendaciones y propuesta para nuevos estudios glaciológicos y climatológicos en Campo de Hielo Sur 399
10.1 De los sensores y mediciones actuales..... 399
10.1.1 Módulos habitacionales/oficina/baño/garajes de motos de nieve 400
10.1.2 Torres para estaciones meteorológicas 402
10.1.3 Sensores meteorológicos 403
10.1.4 Torres nivométricas 404
10.1.5 Cámaras fotográficas 404
10.1.6 Sensores de presión de agua..... 405
10.1.7 Vuelos aerotransportados 406
10.2 Nuevas variables a medir 406
10.3 Propuesta de actualización de equipos y nuevos sitios de medición 408
10.3.1 Proyecto prioridad 1 408
10.3.2 Proyecto prioridad 2 411
10.3.3 Proyecto prioridad 3 412

11 Referencias 415

Anexo A Equipo de Trabajo 430

Anexo B Bitácoras de Terreno 431

B.1 Campaña realizada entre 27/04/14 y 13/05/14 431

B.2 Campaña realizada entre 14/09/14 y 19/10/14 432

B.3 Campaña realizada entre 03/04/15 y 07/05/15 433

B.4 Campaña realizada entre 02/09/15 y 29/10/15 436

B.1 Campaña realizada entre 17/06/16 y 29/10/16 439

Anexo C Talleres de divulgación y resultados 441

Anexo D Adquisición de Motos de Nieve 450

Anexo E Fichas de Mantención 455

E.1 Campaña realizada entre 14/09/14 y 19/10/2014 455

E.1.1 O'Higgins 455

E.1.2 Témpano 456

E.1.3 *Greve* 458

E.1.4 Jorge Montt 460

E.2 Campaña realizada entre 03/04/15 y 07/05/15 462

E.2.1 O´Higgins 462

E.2.2 Témpano 465

E.2.3 Jorge Montt 468

E.3 Campaña realizada entre 02/09/15 y 29/10/15 471

E.3.1 O'Higgins 471

E.3.2 Témpano 477

E.3.3 Greve 482

E.3.4 Jorge Montt 485

E.4 Campaña realizada entre 17/06/16 y 18/07/16 489

E.4.1 O'Higgins 489
E.4.2 Témpano 493
E.4.3 Greve 498
E.4.4 Jorge Montt 500
Anexo F Motos de nieve 501
F.1 Detalle del procedimiento para traslado en moto de nieve 501
F.2 Trineos 502
F.3 Frenos 503
F.4 Amarra del piloto 503
F.5 Manejo en cordada 504
F.6 Terreno agreste 505
Anexo G Especificaciones y diseño de estructuras 507

Lista de Figuras

Figura 2.1 Localización de las estaciones meteorológicas de periferia y meseta (*plateau*) de Campo de Hielo Sur. Inserto muestra localización de otras estaciones meteorológicas analizadas en este informe. 10

Figura 2.2 Variables meteorológicas obtenidas desde el sistema de adquisición de datos de la DGA para las tres estaciones de periferia..... 11

Figura 2.3 Contexto general de patrones de circulación para Sudamérica. 15

Figura 2.4 Temperatura del aire a ~1500 m snm sobre el cuadrante norte de CHS. Línea roja indica el promedio de las temperaturas mensuales y líneas verdes los percentiles indicados en la figura..... 16

Figura 2.5 Precipitación anual (contornos de colores) obtenida de los datos del modelo climático regional PRECIS-DGF (~25 km) (Garreaud et al., 2014). Inserto corresponde a la climatología de los glaciares ubicados en Campo de Hielo Sur y que, por lo tanto, contienen a los glaciares del área de estudio. Barras corresponden a las precipitaciones mensuales, línea segmentada corresponde a la humedad relativa (escala a la derecha) y línea continua a los valores de temperatura en °C [*Sagredo and Lowell*, 2012]..... 17

Figura 2.6 Perfil longitudinal promedio la precipitación promedio anual de datos PRECIS-DGF (línea negra en [mm] escala a la izquierda) entre aproximadamente los 42°S y 52°S.

Elevación del terreno corresponde al sombreado gris, escala en la izquierda (m *10) [*Garreaud et al.*, 2013]. ... 18
Figura 2.7 Anomalía de las temperaturas del aire para la zona norte de Campo de Hielo Sur en 700 hPa. Datos re-análisis NCEP-NCAR. 20
Figura 2.8 Regresión lineal por mes de la temperatura del aire a 850 hPa, correspondiente aproximadamente a 1500 m snm, la altitud del *plateau* de Campo de Hielo Sur. Periodo corresponde a 1979-2013. Las zonas de achurado de colores corresponden a las estadísticamente significativas ($p<0.05$). Escala de colores en °C. 22
Figura 2.9 Tendencia de la precipitación decadal en estaciones DGA y DMC en la zona norte de Campo de Hielo Sur. Fuente http://explorador.cr2.cl/ 23
Figura 2.10 Tendencias de temperaturas del aire promedio en verano para las estaciones ubicadas al noreste de Campo de Hielo Sur. 25
Figura 2.11 Temperatura promedio diaria de las tres estaciones periferia: O'Higgins, Témpano y Jorge Montt. 27
Figura 2.12 Comparación entre los datos promedio diario de la temperatura del aire de las tres estaciones meteorológicas de periferia. 28
Figura 2.13 Humedad relativa promedio diaria de las tres estaciones analizadas. 29
Figura 2.14 Comparación entre los datos promedio diario de la humedad relativa del aire de las tres estaciones meteorológicas de periferia. 30

Figura 2.15 Presión atmosférica promedio diaria de las tres estaciones de periferia. 31
Figura 2.16 Velocidad del viento promedio diaria registradas por las tres estaciones de periferia..... 32
Figura 2.17 Rosa de los vientos: datos obtenidos directamente de las tres estaciones de periferia..... 33
Figura 2.18 Radiación de onda corta en las tres estaciones de periferia. Línea verde indica radiación solar potencial (onda corta) para la localización y altitud de la estación Glaciar O´Higgins. Valores son promedios diarios..... 34
Figura 2.19 Ciclo diario de la radiación solar incidente de onda corta en las tres estaciones de periferia. Como referencia se muestra la radiación potencial estimada para la localización y altitud de la estación O´Higgins..... 35
Figura 2.20 Promedio diario de la radiación de onda larga incidente en las tres estaciones de periferia en CHS. 36
Figura 2.21 Precipitaciones diarias en las tres estaciones periferia CHS..... 38
Figura 2.22 Carta sinóptica del 25 de julio de 2015. Nivel de 850 hPa. Isolíneas blancas corresponde a altura geopotencial, flechas corresponden a magnitud y dirección del viento y sombrado de colores a la temperatura en 850 hPa. Punto rojo indica localización de Campo de Hielo Sur. Datos corresponden a re-análisis NCEP-NCAR..... 38
Figura 2.23 Promedio diario de la temperatura del aire de estaciones instaladas en meseta de CHS..... 40
Figura 2.24 Detalle del periodo de en común de mediciones de temperatura del aire en estaciones de meseta. 40

Figura 2.25 Humedad relativa del aire promedio registrada en las tres estaciones de meseta en CHS. 41
Figura 2.26 Presión atmosférica de las tres estaciones en meseta en CHS. Datos promedio diarios. 43
Figura 2.27 Mapa sinóptico del 5 de febrero de 2016. Isolíneas blancas corresponde a altura geopotencial, flechas corresponden a magnitud y dirección del viento y sombrado de colores a la temperatura en 850 hPa. Punto rojo indica localización de CHS. Datos corresponden a re-análisis NCEP-NCAR. 43
Figura 2.28 Velocidad promedio diario del viento en las tres estaciones en meseta de CHS. 44
Figura 2.29 Relación entre velocidad del viento y presión atmosférica en estación HS Glaciar Greve Nunatak Occidental. 45
Figura 2.30 Rosa de vientos indicando dirección y magnitud del viento en estaciones en meseta de CHS. Datos instantáneos para el periodo octubre 2015 a julio 2016 (HS Greve Nunatak occidental y O'Higgins) y octubre 2014 a junio 2016 (HS Greve). 46
Figura 2.31 Relación entre dirección del viento y presión atmosférica en estación HS Glaciar Greve Nunatak Occidental. 47
Figura 2.32 Radiación de onda corta en las tres estaciones de meseta de CHS. Línea negra indica radiación solar potencial (onda corta), valores promedios diarios. 48
Figura 2.33 Radiación de onda larga estaciones Greve Nunatak occidental y O´Higgins. Valores promedios diarios. 49
Figura 2.34 Perfil topográfico longitudinal a latitud 48.8ºS, en la zona norte de CHS. Se muestra la temperatura del aire promedio de las estaciones en el periodo octubre 2015 a

marzo 2016 (panel superior). Como referencia se muestran los datos de climatología CRU 3.1. Perfil topográfico de la zona con la localización de las estaciones (panel inferior). 51
Figura 2.35 Perfil topográfico longitudinal a latitud 48.8ºS, en la zona norte de CHS. Se muestra la humedad relativa promedio de las estaciones en el periodo octubre 2015 a marzo 2016 (panel superior). Perfil topográfico de la zona con la localización de las estaciones (panel inferior). 52
Figura 2.36 Diagrama de la radiación solar incidente en las tres estaciones de periferia. Como referencia se muestra la radiación potencial calculada como la radiación que llega al tope de la atmosfera. 54
Figura 2.37 SRTM DEM utilizado para la distribución espacial de la temperatura del aire (derecha) y zonas representativas estimadas de gradientes de temperatura observados (izquierda). 57
Figura 2.38 Temperatura del aire (extrapolada y observada) para el punto de localización de la estación Hielo Sur en el Glaciar Greve..... 58
Figura 2.39 Distribución espacial del derretimiento acumulado en el periodo octubre 2015 a marzo 2016 en CHS. 61
Figura 2.40 Derretimiento diario total de la zona norte de CHS. 62
Figura 2.41 Derretimiento mensual de toda el área norte de CHS, periodo octubre 2015 a marzo 2016. 62
Figura 3.1 Zona austral de Chile, caracterizada por fiordos de fachada occidental y lagos pedemontanos de fachada oriental. 69

Figura 3.2 CHS representado en un mosaico Landsat ETM+ de gran calidad visual (escena superior, 10/27/2000; escena inferior, 01/14/2001). Se indican los glaciares emblemáticos. 71
Figura 3.3 Izq. Los tres glaciares del sector norte del CHS en destacado (JM, O'H y T). Der. Imágenes ampliadas en base a escena Landsat OLI (03/12/2016). 74
Figura 3.4 Ejemplo de panorámica del Jorge Montt el día 24 de abril del 2015. 78
Figura 3.5 Superposición del modelo digital de elevación sobre captura fotográfica del glaciar Jorge Montt del 24 de abril del 2015. 79
Figura 3.6 Grilla de puntos monitoreados en la porción visible del glaciar Jorge Montt y ajustada con el modelo digital de elevación. 79
Figura 3.7 Panorámica del glaciar Témpano en el sitio inicial, el día 9 de junio de 2014. 80
Figura 3.8 Panorámica del glaciar Témpano desde octubre de 2014 a abril de 2015. 80
Figura 3.9 Ajuste generado para la vista fotográfica del glaciar Témpano en el período mayo- octubre 2014. 81
Figura 3.10 Ajuste generado para la vista fotográfica del glaciar Témpano en el período octubre 2014-abril 2015. 82
Figura 3.11 Grilla de puntos monitoreados en la porción visible del glaciar Témpano y ajustada en la vista inicial. 83
Figura 3.12 Grilla de puntos monitoreados en la porción visible del glaciar Témpano y ajustada en la vista final. 83
Figura 3.13 Panorámica del glaciar O'Higgins el día 11 de mayo de 2014. 84

Figura 3.14 Superposición de modelo 3D y captura fotográfica del día 24 de abril del 2015. 84
Figura 3.15 Grilla de puntos monitoreados en la porción visible y ajustada del glaciar O'Higgins. 85
Figura 3.16 Variaciones del glaciar Jorge Montt desde 1945 [*Rivera et al.*, 2012b]. 88
Figura 3.17 Variaciones del glaciar Jorge Montt desde 2012..... 89
Figura 3.18 Variaciones frontales de Jorge Montt expresadas en m/d.. 91
Figura 3.19 Cambios frontales 1945-2007 de Glaciar Témpano y Bernardo..... 93
Figura 3.20 Variaciones del glaciar Témpano desde 2012. 94
Figura 3.21 Variaciones frontales de Témpano expresadas en m/d. 96
Figura 3.22 Velocidades de hielo promedio (m/d) en la zona visible del Glaciar Jorge Montt. 97
Figura 3.23 Vectores de flujo de hielo en el glaciar Jorge Montt obtenidos con *feature tracking* entre los días 14 y 21 de enero de 2016. 98
Figura 3.24 Acercamiento al mapa de vectores de flujo de hielo en la parte baja del glaciar Jorge Montt en el período mencionado en Figura 3.23. 99
Figura 3.25 Velocidades de hielo promedio (m/d) en la zona visible del Glaciar Témpano..... 100
Figura 3.26 Vectores de flujo de hielo en el glaciar Témpano obtenidos con *feature tracking* entre los días 14 y 21 de enero de 2016. 101
Figura 3.27 Variaciones históricas del Glaciar O'Higgins y su relación con la batimetría del lago. Fuente; Modificado de [*Casassa et al., 2007*]. 104
Figura 3.28 Variaciones del glaciar O'Higgins desde 2012..... 105

Figura 3.29 Variaciones frontales de O'Higgins expresadas en m/d. .. 106
Figura 3.30 Velocidades promedio en la zona visible del Glaciar O'Higgins en m/d. 107
Figura 3.31 Vectores de flujo de hielo en la lengua del glaciar O'Higgins obtenidos con *feature tracking* entre los días 14 y 21 de enero de 2016. 108
Figura 4.1 Serie de nivel de agua original del lago O'Higgins (azul) y corregida (rojo). 119
Figura 4.2 Gráfico de dispersión de datos de nivel del lago O'Higgins versus O'Higgins_Villa entre diciembre 2013 y junio 2016..... 120
Figura 4.3 Nivel de agua del fiordo Jorge Montt. 121
Figura 4.4 Nivel de agua del fiordo Témpano. 122
Figura 4.5 Espectros de Fourier en registros de nivel de agua del fiordo Jorge Montt. 123
Figura 4.6 Espectros de Fourier en registros de nivel del agua del fiordo, Témpano. Verificar constituyentes de mareas en la Figura 4.5. 123
Figura 4.7 Residuales de nivel de aguas luego de remover constituyentes diurnos (sup.), semidiurnos (centro) y ambos (inf.), Jorge Montt. 125
Figura 4.8 Residuales de nivel de aguas luego de remover constituyentes diurnos (sup.), semidiurnos (centro) y ambos (inf.), Témpano. 125
Figura 4.9 Perfil batimétrico en las proximidades del frente del glaciar Jorge Montt. 127
Figura 4.10 Perfil batimétrico transversal, fiordo Témpano. 128
Figura 4.11 Nivel y temperatura del agua en el lago O'Higgins entre diciembre 2013 y abril 2014. 129

Figura 4.12 Nivel de agua versus temperatura de agua en el lago O'Higgins. 130
Figura 4.13 Nivel de agua en el lago O'Higgins desde diciembre 2013 hasta junio 2016. 131
Figura 4.14 Perfil batimétrico transversal, lago O'Higgins. 132
Figura 5.1 Perfiles longitudinales y transversales para el Levantamiento LiDAR para la zona norte de CHS (Imagen de fondo, Landsat8 14 de enero del 2015, proyección UTM, Zona 18S, Datum WGS84). 139
Figura 5.2 (a) Perfil vertical zona de calibración (techumbres), (b) datos *RAW* sin calibración, (c) datos calibrados aplicando metodología "*Tie Lines*". 143
Figura 5.3 Montaje del sistema CAMS en *Heli-utility Pod*, helicóptero *AS350-B3*. 145
Figura 5.4 Imagen capturada desde una cámara Canon EOS 7D durante la calibración del sistema. Caleta Tortel. 146
Figura 5.5 Imagen zona de calibración. Comuna de Villa O'Higgins. 150
Figura 5.6 Modelos utilizados para la comparación de elevación interanual. (a) IGM; (b) SRTM y (c) CAMs. (Imagen de fondo, Landsat8 14 de enero del 2015, proyección UTM, Zona 18S, Datum WGS84). 153
Figura 5.7 Perfil de elevación L-L' (m) con DEM utilizados (1975, 2000, 2015). Tramos: (a) 0 -30km; (b) 30-50km; (c) 50-75km y (d) 75-100km 156
Figura 5.8 Perfil de elevación T-T' (m) con DEM utilizados (1975, 2000, 2015). Tramos: (a) 0-18km; (b) 18-48km y (c) 48-65km. 157
Figura 5.9 Cambios de elevación CHS (m/a), CAMs- IGM 1975. (a) Zona de traslape glaciar Jorge Montt, (b) Zona de

traslape glaciar Tempano y (c) Zona de traslape glaciar O'Higgins (Imagen de fondo, Landsat8 14 de enero del 2015, proyección UTM, Zona 18S, Datum WGS84). 158
Figura 5.10 Cambios de elevación CHS (m/a), CAMs-SRTM 2000 (Imagen de fondo, Landsat8 14 de enero del 2015, proyección UTM, Zona 18S, Datum WGS84). 159
Figura 6.1 Radar GPR GSSI. Unidad de control SIR-3000 (izquierda) y antena de 400 MHz (derecha). 166
Figura 6.2 Detalle de la antena *Bow-Tie* de la parte transmisora del radar. 167
Figura 6.3 Vista del sistema de radar transportado como carga colgante, sobrevolando el *plateau*, en el Glaciar O'Higgins, durante la campaña de septiembre de 2015. . 168
Figura 6.4 Esquema y diagrama en bloques del sistema de radar. .. 170
Figura 6.5 Mediciones con GPR realizadas en los glaciares Greve y O'Higgins. Los colores del perfil indican cota superficial. Imagen de fondo: Landsat 8, 16 de marzo de 2014, proyección UTM, zona 18S, Datum WGS84. 171
Figura 6.6 Líneas de vuelo completadas durante la primera y segunda campaña de medición de radar, incluyendo las fechas de medición. La imagen de fondo corresponde a Landsat 8 del 14 de enero de 2015, proyección UTM, Zona 18S, Datum WGS84. 173
Figura 6.7 Radargrama del perfil medido con el radar terrestre. La imagen superior corresponde al radargrama sin datos interpretados. La inferior incluye las capas de acumulación detectadas (Localización del perfil A-B en Figura 6.5). 180

Figura 6.8 Perfiles longitudinales y transversales con interpretación del espesor de hielo (en escala de colores). La imagen de fondo corresponde a Landsat 8 del 14 de enero de 2015, proyección UTM, Zona 18S, Datum WGS84. 183
Figura 6.9 Perfiles longitudinales y transversales con elevaciones subglaciales (en escala de colores). La imagen de fondo corresponde a Landsat 8 del 14 de enero de 2015, proyección UTM, Zona 18S, Datum WGS84. 184
Figura 6.10 Perfil longitudinal L1-L43: radargrama correspondientes a las dos primeras divisiones del perfil (L1-A y A-B) de datos originales (imagen superior) y radargramas con representación vectorial en rojo (imagen inferior). 186
Figura 6.11 Perfil longitudinal L1-L43: radargrama correspondientes a las dos primeras divisiones del perfil (L1-A y A-B) de datos originales (imagen superior) y radargramas con representación vectorial en rojo (imagen inferior). 187
Figura 6.12 Perfil longitudinal L1-L43: radargrama correspondientes a las dos primeras divisiones del perfil (L1-A y A-B) de datos originales (imagen superior) y radargramas con representación vectorial en rojo (imagen inferior). 188
Figura 6.13 Perfil longitudinal L1-L43: radargrama correspondientes a la tercer y cuerta divisiones del perfil (B-C y C-L43) de datos originales (imagen superior) y radargramas con representación vectorial en rojo (imagen inferior). 189
Figura 6.14 Histograma del espesor de hielo en el perfil L1-L43. 190
Figura 6.15 Perfil transversal L2-L3: radargrama de datos originales (imagen superior) y radargrama con representación vectorial (imagen inferior). 191
Figura 6.16 Histograma del espesor de hielo en el perfil L2-L3. 191

Figura 6.17 Perfil transversal L4-L5: radargrama dividido en L4-D y D-L5 de datos originales (imagen superior) y radargrama con representación vectorial (imagen inferior). 193
Figura 6.18 Perfil transversal L4-L5: radargrama dividido en L4-D y D-L5 de datos originales (imagen superior) y radargrama con representación vectorial (imagen inferior). 194
Figura 6.19 Histograma del espesor de hielo en el perfil L4-L5. 194
Figura 6.20 Perfil transversal L19-L20: radargrama dividido en L19-E y E-L20 de datos originales (imagen superior) y radargrama con representación vectorial (imagen inferior). 196
Figura 6.21 Perfil transversal L19-L20: radargrama dividido en L19-E y E-L20 de datos originales (imagen superior) y radargrama con representación vectorial (imagen inferior). 196
Figura 6.22 Histograma del espesor de hielo en el perfil L19-L20. 197
Figura 6.23 Perfil transversal L21-L22: radargrama dividido en L21-F y F-L22 de datos originales (imagen superior) y radargrama con representación vectorial (imagen inferior). 198
Figura 6.24 Perfil transversal L21-L22: radargrama dividido en L21-F y F-L22 de datos originales (imagen superior) y radargrama con representación vectorial (imagen inferior). 199
Figura 6.25 Histograma del espesor de hielo en el perfil L21-22. 199

Figura 6.26 Perfil transversal L23-L24: radargrama de datos originales (imagen superior) y radargrama con representación vectorial (imagen inferior). 201
Figura 6.27 Histograma del espesor de hielo en el perfil L23-L24. 201
Figura 6.28 Perfil transversal L29-L30: radargrama de datos originales (imagen superior) y radargrama con representación vectorial (imagen inferior). 202
Figura 6.29 Histograma del espesor de hielo en el perfil L29-L30. 203
Figura 6.30 Perfil transversal L36-L38 radargrama de datos originales (imagen superior) y radargrama con representación vectorial (imagen inferior). 204
Figura 6.31 Histograma del espesor de hielo en el perfil L36-L38. 204
Figura 6.32 Perfil transversal L39-L40: radargrama de datos originales (imagen superior) y radargrama con representación vectorial (imagen inferior). 206
Figura 6.33 Histograma del espesor de hielo en el perfil L39-L40. 207
Figura 6.34 Perfil transversal L41-L42: radargrama de datos originales (imagen superior) y radargrama con representación vectorial (imagen inferior). 208
Figura 6.35 Histograma del espesor de hielo en el perfil L41-L42. 209
Figura 6.36 Perfil longitudinal L56-G del radargrama L56-L57 de datos originales (imagen superior) y radargrama con representación vectorial (imagen inferior). 210
Figura 6.37 Perfil longitudinal G-L57 del radargrama L56-L57 de datos originales (imagen superior) y radargrama con representación vectorial (imagen inferior). 210
Figura 6.38 Histograma del espesor de hielo en el perfil L56-L57. 211
Figura 6.39 Perfiles topográficos de la sección B-C del perfil longitudinal L1-L43 y perfiles transversales L19-L20 y

L29-L30. En ellos, se muestra la topografía superficial (azul), lecho rocoso derivado de radar (rojo), lecho rocoso de gravimetría (negro) y lecho rocoso del modelo de *Huss* (verde). La línea café corresponde a afloramientos rocosos visibles en una imagen Landsat 8, del 14 de enero de 2015. 214

Figura 6.40 Perfil del Glaciar Jorge Montt. Se puede observar la topografía superficial (línea azul), la topografía subglaciar obtenida con el radar aerotrasportado (área café), el espesor obtenido mediante el modelo de Huss (línea verde) y la batimetría (línea roja)..... 216

Figura 6.41 Perfil del Glaciar O'Higgins. Se puede observar la topografía superficial (línea azul), la topografía subglacial obtenida mediante el modelo de Huss (línea verde) y la batimetría (línea roja). 217

Figura 6.42 Perfil del Glaciar Témpano. Se puede observar la topografía superficial (línea azul), la topografía subglacial obtenida mediante el modelo de Huss (línea verde) y la batimetría (línea roja). 218

Figura 7.1 Ubicación de las tres torres nivométricas instaladas en el *plateau* de Campo de Hielo Sur (triángulos) y ruta de la travesía en motos de nieve (línea roja). 224

Figura 7.2 Primera torre nivométrica en operación. Imagen: 28 de septiembre de 2015. 224

Figura 7.3 Motos de nieve en formación para la travesía a través de la meseta para la instalación de las torres nivométricas y pozos estratigráficos. A la derecha de las motos se observa el trineo con uno de los segmentos de la

segunda torre nivométrica y los implementos necesarios para su instalación. 225
Figura 7.4 Segunda torre nivométrica. Imagen: 23 de octubre de 2015. 226
Figura 7.5 Tercera torre nivométrica. Imagen: 24 de octubre de 2015. 227
Figura 7.6. Esquema de pozos estratigráficos realizados. 228
Figura 7.7 Pozos estratigráficos para medición de densidad de nieve. Imágenes: 28 de septiembre al 24 de octubre de 2015. 229
Figura 7.8 Balance de masa de la torre nivométrica 1 para el período de verano. 236
Figura 7.9 Pozos de nieve en TN1 (48°50’1,92’’S, 73°34’51,12’’O) del Glaciar Greve realizados en 2015 y 2016. En negro, densidades de nieve medidas con cuña. En rojo, temperatura de la nieve medida con termistores. En azul, presencia de lentes de hielo en la columna vertical. 237
Figura 7.10 Balance de masa (m eq.a.) de la torre nivométrica 1 para el período de verano (octubre−febreo) 238
Figura 7.11 Registros de acumulación de la torre nivométrica 1 (m eq.a.) comparados con precipitaciones registradas en estaciones AWS periféricas de Témpano y O’Higgins. Las flechas con números indican los eventos que se observan en los registros de precipitación de las estaciones AWS. 239
Figura 7.12 Balances de masa de la torre nivométrica 2 para el período de verano 241
Figura 7.13 Pozo de nieve TN2 (48°54’30,81’’S, 73°27’47,25’’O) del Glaciar Greve realizados en dos fechas. En negro,

densidades de nieve medidas con cuña. En rojo, temperatura de la nieve medida con termistores. En azul, presencia de lentes de hielo en la columna vertical. 243
Figura 7.14 Balance de masa (m eq.a.) de la torre nivométrica 2 para el período estival. 244
Figura 7.15 Registros de acumulación de la torre nivométrica 2 (m eq.a.) comparados con precipitaciones registradas en estaciones AWS periféricas de Témpano y O'Higgins. Las flechas con números indican los eventos que se observan en los registros de precipitación de las estaciones AWS 245
Figura 7.16 Datos registrados por la torre nivométrica 3 durante el período estival 2015-2016..... 247
Figura 7.17 Pozo de nieve en TN3 (48°51'33,94''S, 73°31'37,05''O) del Glaciar Greve. En negro, densidades de nieve medidas con cuña. En rojo, temperatura de la nieve medida con termistores. En Azul, presencia de lentes de hielo en la columna vertical. 248
Figura 7.18 Comparación entre los registros de acumulación de las torres nivométricas (1 y 2) y los registros de precipitación acumulada de las estaciones AWS periféricas Témpano y O'Higgins. Las flechas indican eventos identificados en los datos. 249
Figura 7.19 Balance de masa de la torre nivométrica 1 para el período completo del año hidrológico 2015-2016. En el gráfico, la línea vertical separa el periodo de acumulación del periodo de ablación. 253

Figura 7.20 Balance de masa de la torre nivométrica 2 para el período de invierno. En el gráfico, la línea vertical separa el periodo de acumulación del periodo de ablación. 255
Figura 7.21 Radargrama del perfil A-B medido con el radar terrestre, en el que se identifican las capas de acumulación detectadas (Localización del perfil A-B en Figura 6.5). ... 256
Figura 7.22 Estimación de serie de balance de masa anual con radar en Torre 2 y comparación con serie de balance de masa en el testigo del Pío XI [*Schwikowski et al.*, 2013], modelo para glaciar Chico [*Rivera*, 2004] y balance anual 2015-2016 en Torre 2. 259
Figura 7.23 Contraste pluviométrico occidente-oriente en CHS con datos obtenidos en este proyecto para Torres 1 (punto azul superior) y Torre 2 (punto azul inferior). 262
Figura 7.24 Precipitación estimada para distintas alturas del CHS (Rivera et al, 2004) comparados con valores calculados para el año 2015-2016 en Torres 1 y 2 de este proyecto.262
Figura 7.25 serie de tiempo de precipitación observada (Estacion AWS Témpano) y obtenida a partir del re-analisis NCEP-DOE R2 (http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis2.html). 264
Figura 7.26 Precipitación sobre Patagonia obtenida con modelo RACMO2. Fuente: Laenerts et al. (2014) 265
Figura 8.1 Localización de la estación meteorológica (AWS), nivel de agua y sistema de cámara fija en las proximidades del Glaciar Jorge Montt. 268
Figura 8.2 Instalación y mantenimiento de la estación meteorológica Jorge Montt 271

Figura 8.3 Instalación del pluviómetro *Young* 52203 en la estación meteorológica Jorge Montt 272
Figura 8.4 Localización de la estación meteorológica (AWS), nivel de agua y sistema de cámara fija en las proximidades del Glaciar Témpano 274
Figura 8.5 Sensores y equipos de la estación meteorológica Glaciar Témpano 276
Figura 8.6 Instalación de nueva estructura para el sensor de precipitación en la estación Glaciar Témpano 277
Figura 8.7 Localización de la estación meteorológica (AWS), nivel de agua y sistema de cámara fija en las proximidades del Glaciar O'Higgins 279
Figura 8.8 Sensores y equipos de la estación meteorológica Glaciar O'Higgins 281
Figura 8.9 Especificaciones estructurales del sistema de fijación del sensor de nivel de agua 284
Figura 8.10 Instalación de la estación de nivel de agua en el fiordo del Glaciar Jorge Montt 285
Figura 8.11 Instalación de la estación de nivel de agua en el fiordo del Glaciar Témpano 288
Figura 8.12 Equipos de captura y energización de la estación de nivel de agua del lago O'Higgins 291
Figura 8.13 Instalación del sensor de nivel de agua por presión en el lago O'Higgins. 292
Figura 8.14 Instalación del sistema de cámara fija del Glaciar Jorge Montt 294
Figura 8.15 Esquema de red fotogramétrica e imagen capturada por cámara fija 295

Figura 8.16 Instalación del sistema de cámara fija del Glaciar Témpano 298
Figura 8.17 Esquema de red fotogramétrica e imagen capturada por cámara fija 299
Figura 8.18 Instalación del sistema de cámara fija del Glaciar O'Higgins 302
Figura 8.19 Esquema de red fotogramétrica e imagen capturada por cámara fija. 303
Figura 8.20 Instalación de un nuevo sistema de captura (CECs) en la cámara fija del Glaciar O'Higgins 304
Figura 8.21 Localización de las estaciones meteorológicas AWS en Glaciar Greve (triángulo central), en Glaciar Greve Nunatak Occidental (triángulo izquierdo) y AWS en Glaciar O'Higgins (triángulo derecho) 306
Figura 8.22 Estación meteorológica Hielo sur en Glaciar Greve 307
Figura 8.23 Trabajos de instalación de la estación meteorológica Hielo sur en Glaciar Greve 311
Figura 8.24 Estación meteorológica Hielo sur en Glaciar Greve Nunatak Occidental 314
Figura 8.25 Trabajos de instalación de la estación meteorológica Hielo sur en Glaciar Greve Nunatak Occidental 318
Figura 8.26 Estación meteorológica Hielo sur en Glaciar O'Higgins 321
Figura 8.27 Trabajos de instalación de la estación meteorológica Hielo sur en Glaciar O'Higgins 325
Figura 9.1 Ruta seguida durante el sobrevuelo de reconocimiento de posibles sitios de instalación de las Estaciones Glaciológicas en el sector norte de CHS (06 de mayo de 2014). 328

Figura 9.2 *Nunatak* seleccionado para la instalación de la primera Estación Glaciológica "Greve" (triángulo naranjo). 330
Figura 9.3 Ruta de sobrevuelos de reconocimiento para la selección de sitios de instalación de Estaciones Glaciológicas (octubre 2014). 331
Figura 9.4 Los puntos azules corresponden a lugares evaluados en terreno para la instalación de los módulos. El triángulo verde corresponde al *nunatak* seleccionado para la Estación Glaciológica Greve. El cuadrado con líneas punteadas, indica el sitio para la estación O'Higgins. El diamante rojo marca el lugar para instalación de la Estación Glaciológica Témpano. En negro divisorias de cuencas glaciares. En línea amarilla, rutas terrestres planificadas para tránsito seguro. 333
Figura 9.5 *Nunataks* o afloramientos rocos en la zona norte de CHS sobrevolados y evaluados durante la selección de sitios para la implementación de las estaciones glaciológicas (octubre 2014). 334
Figura 9.6 Mapa geológico regional de los Campos de Hielo Norte y Sur (CHN y CHS). Se presentan las litologías de la zona de estudio [modificado de *SERNAGEOMIN*, 2003]..... 337
Figura 9.7 Muestra de afloramiento *nunatak* Greve. Granito de biotita y hornblenda. 339
Figura 9.8 Rocas metamórficas del *nunatak* Témpano. 340
Figura 9.9 El punto amarillo señala la ubicación del *nunatak* O'Higgins. La imagen de fondo corresponde a Landsat 8 del 14 de enero de 2015, proyección UTM, Zona 18S, Datum WGS84. 340

Figura 9.10 Muestras obtenidas en el *nunatak* O'Higgins. A) Roca metamórfica con bandas deformadas de cuarzo. B) Mármol verde. 341
Figura 9.11 Intercalaciones de metapelitas con meta-areniscas. 342
Figura 9.12 Afloramiento del CMAO, donde se destaca, en color rojo, las bandas de cuarzo plegadas y deformadas. 343
Figura 9.13 Plano arquitectónico (vista frontal) de módulos para Estación Glaciológica en Glaciar Greve. 349
Figura 9.14 Plano arquitectónico (planta y elevación lateral) de módulo 18 m^2 para Estación Glaciológica en Glaciar Greve. 350
Figura 9.15 Plano arquitectónico (planta y elevación lateral) de módulo 12 m^2 para Estación Glaciológica en Glaciar Greve. 351
Figura 9.16 Plano arquitectónico (vista frontal) de módulos para Estación Glaciológica en Glaciar Témpano. 352
Figura 9.17 Plano arquitectónico (planta y elevación lateral) de módulo 18 m^2 para Estación Glaciológica en Glaciar Témpano..... 353
Figura 9.18 Plano arquitectónico (planta y elevación lateral) de módulo 12 m^2 para Estación Glaciológica en Glaciar Témpano..... 354
Figura 9.19 Plano arquitectónico (vista frontal) de módulos para Estación Glaciológica en Glaciar O'Higgins. 355
Figura 9.20 Plano arquitectónico (planta y elevación lateral) de módulo 18 m^2 para Estación Glaciológica en Glaciar O'Higgins. 356

Figura 9.21 Plano arquitectónico (planta y elevación lateral) de módulo 12 m^2 para Estación Glaciológica en Glaciar O'Higgins. 357
Figura 9.22 Campamento provisional instalado en Campo de Hielo Sur (octubre 2014)..... 358
Figura 9.23 Instalación de los módulos habitacionales, Estación Glaciológica Greve (octubre 2014)..... 360
Figura 9.24 Mobiliario durante la instalación en los módulos habitacionales, estación Glaciológica Greve (octubre 2014). 361
Figura 9.25 Sección baño en el módulo de 12 m^2, Estación Glaciológica Greve (octubre 2014)..... 362
Figura 9.26 Garajes para motos de nieve del proyecto, estación Glaciológica Greve (octubre 2014)..... 363
Figura 9.27 Estación Glaciológica Greve implementada (octubre 2014). 364
Figura 9.28 Primera Estación Glaciológica instalada en octubre de 2014 en la parte alta del Glaciar Greve. En la fotografía superior, de izquierda a derecha, se observan tres de los cuatro garajes amarillos para motos de nieve, el módulo de 18 m^2 y el de 12 m^2 (abril de 2015). 366
Figura 9.29 Garajes de moto a cerca de 3 m sobre la superficie de nieve en abril 2015. 367
Figura 9.30 Situación antes (izquierda) y después (derecha) del trabajo de despeje de nieve de módulo de 18 m^2 (arriba) y de 12 m^2 (abajo) de la Estación Glaciológica Greve (septiembre de 2015)..... 369

Figura 9.31 Garajes de motos de nieve en Estación Glaciológica Greve (panel superior), motos de nieve en operación (panel inferior) septiembre - octubre de 2015. 370
Figura 9.32 Estación Glaciológica Greve: módulo 18 m^2 (izquierda) y módulo 12 m^2 (derecha) en junio − julio de 2016. 371
Figura 9.33 Fotos de la reubicación del garaje instalado sobre roca, cerca de estación meteorológica Greve. 371
Figura 9.34 Traslado de moto de nieve mediante helicóptero, desde Estación Glaciológica Greve a Villa O'Higgins (junio − julio de 2016). 373
Figura 9.35 Entrega de las cuatro motos de nieve a personal DGA en la ciudad de Coyhaique (julio de 2016). 374
Figura 9.36 Campamento montado en el sitio elegido para la implementación de la segunda Estación Glaciológica Témpano (48º49'58.6''S, 73º43'24.9''O, 1040 m snm). . 375
Figura 9.37 *Nunatak* Témpano seleccionado para la instalación de la segunda Estación Glaciológica. 376
Figura 9.38 Imágenes de la etapa de nivelación del basamento rocoso e instalación de las bases de soporte del módulo de 18 m^2, Estación Glaciológica Témpano (abril 2015). .. 377
Figura 9.39 Módulo de 12 m^2 instalado en el *nunatak* ubicado cerca de la línea de equilibrio del Glaciar Témpano (abril 2015). 378
Figura 9.40 Módulo de 18 m^2 instalado en el mismo *nunatak* del Glaciar Témpano (abril 2015). 378
Figura 9.41 Segunda Estación Glaciológica instalada en la zona de acumulación del Glaciar Témpano (abril 2015). 379
Figura 9.42 Vistas del mobiliario instalado en el interior del módulo de 12m^2 de la Estación Glaciológica Témpano. Un tercio

del módulo se dividió para la instalación del baño (abril 2015). 380
Figura 9.43 Imágenes de las secciones y mobiliario en el interior del módulo de 18 m^2, Estación Glaciológica Témpano (abril 2015). 381
Figura 9.44 Acceso al módulo de 18 m^2 Estación Glaciológica Témpano cubierto por nieve (septiembre 2015). 382
Figura 9.45 Trabajos de despeje de nieve en la Estación Glaciológica Témpano (septiembre de 2015). 383
Figura 9.46 Interior del módulo de 12 m^2, Estación Glaciológica Témpano (septiembre de 2015). 384
Figura 9.47 Interior del módulo de 18 m^2, Estación Glaciológica Témpano (septiembre de 2015). 385
Figura 9.48 Estación Glaciológica Témpano: módulo 12 m^2 (izquierda) y módulo 18 m^2 (derecha) (julio de 2016).... 386
Figura 9.49 Interior del módulo de 12 m^2 en Estación Glaciológica Témpano (julio de 2016). 387
Figura 9.50 Interior del módulo de 18 m^2 en estación glaciológica Témpano (julio de 2016). 388
Figura 9.51 Módulos habitacionales correspondientes a la Tercera Estación Glaciológica en meseta de CHS, en proceso de montaje y verificación en dependencias del CECs en Valdivia (abril de 2015)..... 390
Figura 9.52 Campamento base en la zona alta del Glaciar O´Higgins (octubre de 2015). 391
Figura 9.53 Campamento base durante una jornada de fuertes vientos y precipitación sólida (octubre 2015). 391

Figura 9.54 Instalación de bases del módulo de 18 m^2 en la zona alta del Glaciar O'Higgins: Nivelación de base (arriba) y su fijación a roca (abajo) (octubre de 2015). 392
Figura 9.55 Instalación de bases del módulo de 12 m^2 en la zona alta del Glaciar O'Higgins (octubre de 2015) 392
Figura 9.56 Proceso de montaje del módulo de 18 m^2 de la zona alta del Glaciar O'Higgins (octubre de 2015). 393
Figura 9.57 Módulo de 12 m^2 en la zona alta del Glaciar O'Higgins (octubre 2015). 394
Figura 9.58 Proceso de aislación e impermeabilización del módulo de 18 m^2. En la zona alta del Glaciar O'Higgins (octubre de 2015). 394
Figura 9.59 Interior de módulo de 18 m^2 de la zona alta del Glaciar O'Higgins (octubre de 2015). 395
Figura 9.60 Estación Glaciológica O'Higgins: módulo 18 m^2 (izquierda) y módulo 12 m^2 (derecha) en (julio de 2016). 396
Figura 9.61 Interior del módulo de 18m^2 en Estación Glaciológica O'Higgins (julio de 2016). 396
Figura 9.62 Interior del módulo de 12 m^2 en Estación Glaciológica O'Higgins (julio 2016). 397
Figura 10.1 Localización de transectas propuestas recomendadas para el desarrollo de nuevos estudios en CHS. 414

Lista de Tablas

Tabla 2.1 Información general de las estaciones meteorológicas de periferia. 11

Tabla 2.2 Información general de estaciones meteorológicas de meseta. 12

Tabla 2.3 Estaciones analizadas para determinar tendencia en precipitación. 24

Tabla 2.4 Gradientes de temperatura del aire por sector en CHS. 57

Tabla 3.1 Set satelital empleado. 76

Tabla 3.2 Parámetros empleados en calcular flujo de calving. 86

Tabla 3.3 Variación frontal neta (m) entre fechas indicadas y tasas en períodos anuales (m/a) recientes en Jorge Montt. 90

Tabla 3.4 Variación frontal neta (m) entre fechas indicadas y tasas en períodos anuales (m/a) recientes en Témpano frente occidental (TW) y frente norte (TN). 95

Tabla 3.5 Velocidades de hielo en glaciares de fachada occidental (m/d) en años recientes. 102

Tabla 3.6 Parámetros del flujo de *calving* para glaciares Jorge Montt y Témpano, período 2014-2016. 103

Tabla 3.7 Variación frontal neta (m) entre fechas indicadas y tasas en períodos anuales (m/a) recientes en O'Higgins. 106

Tabla 3.8 Velocidades de hielo en glaciar O'Higgins (m/d) en años recientes. 109

Tabla 3.9 Parámetros del flujo de calving para el glaciar O'Higgins, período 2014-2016. 110

Tabla 3.10 Velocidades de hielo aproximadas en las zonas frontales (m/d) de los tres glaciares en estudio. Se indica período de medición entre paréntesis. 112

Tabla 4.1 Período de registro de nivel de agua por estación. 118
Tabla 5.1 Coordenadas UTM y elevación, vértice Sirgas CCRN, estación base y PRs. Huso 18S, sistema de referencia SIRGAS, basado en modelo geoidal EGM08. 147
Tabla 5.2 Detalle por día de trabajo, perfiles sobrevolados en la zona. Distancia lineal (km) 148
Tabla 5.3 Coordenadas UTM y elevación, vértice VLLA, estación base. Huso 18S, sistema de referencia WGS-84, basado en modelo geoidal EGM08. 149
Tabla 5.4 Detalle por día de trabajo, perfiles sobrevolados en la zona. Distancia lineal (km). 151
Tabla 5.5 Tasas de cambio de elevación Δh/Δt - m/a (metros por año) promedio y valores máximos cubiertos. 154
Tabla 5.6 Tasas de cambio de elevación Δh/Δt (m/a) y valores máximos en zonas con traslape de datos perfiles L-L′ y T-T′ (Ver Figura 5.1 para ubicación) 155
Tabla 6.1 Detalle de cobertura temporal de mediciones de radar... 174
Tabla 6.2 Datos estadísticos del espesor de las primeras 20 capas detectadas en la interpretación de los datos de acumulación de nieve, por capa de acumulación. 181
Tabla 6.3 Resultados de distancia total recorrida (DT), distancia cubierta por datos interpretados de espesor (E. Esp.), espesores (en m) mínimos (E. mín), máximos (E. máx), promedios (E. prom), desviación estándar (DE), elevaciones mínimas (Elev. mín) y máximas (Elev. máx).212
Tabla 7.1 Ficha de medición de densidad de nieve en Torre Nivométrica 1 obtenida durante la campaña de julio de 2016. 231

Tabla 7.2 Ficha de medición de densidad de nieve en Torre Nivométrica 3 obtenida durante la campaña de julio de 2016. 231
Tabla 7.3 Ficha de medición de densidad de nieve en la Torre Nivométrica 1 obtenida durante la campaña de septiembre-octubre 2015. 232
Tabla 7.4 Ficha de medición de densidad de nieve en la Torre Nivométrica 2 obtenida durante la campaña de septiembre-octubre 2015. 233
Tabla 7.5 Ficha de medición de densidad de nieve en la Torre Nivométrica 3 obtenida durante la campaña de septiembre-octubre 2015. 233
Tabla 7.6 Balance de masa (m eq. a) obtenidos con radar a 1298 m snm (Greve) y a 2600 m snm en Pío XI [*Schwikowski et al.*, 2013]. 258
Tabla 7.7 Acumulación de nieve anual (m eq. a./a) en el Campo de Hielo Sur. 261
Tabla 8.1 Componentes de la estación meteorológica Jorge Montt . 269
Tabla 8.2 Componentes de la estación meteorológica Glaciar Témpano..... 274
Tabla 8.3 Componentes de la estación meteorológica Glaciar O'Higgins 279
Tabla 8.4 Componentes de la estación de nivel de agua del Glaciar Jorge Montt 283
Tabla 8.5 Componentes de la estación de nivel de agua del Glaciar Témpano..... 286
Tabla 8.6 Componentes de la estación de nivel de agua del Glaciar O'Higgins 290

Tabla 8.7 Componentes del sistema de cámara fija del Glaciar Jorge Montt 293
Tabla 8.8 Componentes del sistema de cámara fija del Glaciar Témpano..... 296
Tabla 8.9 Componentes del sistema de cámara fija del Glaciar O'Higgins 300
Tabla 8.10 Componentes de la estación meteorológica principal, Hielo sur en Glaciar Greve 308
Tabla 8.11 Componentes de la estación meteorológica de respaldo, Hielo sur en Glaciar Greve 309
Tabla 8.12 Componentes de la estación meteorológica principal, Hielo sur en Glaciar Greve Nunatak Occidental..... 315
Tabla 8.13 Componentes de la estación meteorológica de respaldo, Hielo sur en Glaciar Greve Nunatak Occidental..... 316
Tabla 8.14 Parámetros de transmisión, estación principal HS en Glaciar Greve Nunatak Occidental 319
Tabla 8.15 Componentes de la estación meteorológica principal, Hielo sur en Glaciar O'Higgins 322
Tabla 8.16 Componentes de la estación meteorológica de respaldo, Hielo sur en Glaciar O'Higgins 323
Tabla 8.17 Parámetros de transmisión, estación principal HS en Glaciar O'Higgins..... 326
Tabla 9.1 Inventario de la Estación Glaciológica Greve (julio 2016). 372
Tabla 9.2 Inventario de la Estación Glaciológica Témpano (julio 2016). 389
Tabla 9.3 Inventario de la Estación Glaciológica O'Higgins (julio 2016). 398

1 Introducción

Con fecha 15 de octubre de 2013, el Ministerio de Obras Públicas (MOP) a través de la Dirección General de Aguas (DGA), mediante el Sistema de Mercado Público, llama a licitación y concurso el proyecto que denomina "Línea Base Glaciológica del Sector Norte de Campo de Hielo Sur: Glaciares Jorge Montt, Témpano y O`Higgins" código **ID 1020-48-LP13**. El Laboratorio de Glaciología del Centro de Estudios Científicos (CECs), diseña y presenta una propuesta de trabajo que contempla un Plan que incluye el 100% de los entregables que forman parte del trabajo licitado. Con fecha 24 de diciembre de 2013, el Comité de evaluación de proyectos, una vez revisadas cada una de las propuestas y antecedentes presentados a la licitación, adjudica el proyecto a la propuesta presentada por el CECs, emitiendo la respectiva Acta de Adjudicación. Posteriormente, el MOP-DGA genera la Orden de Compra Nº1020-649-SE13, de fecha 25 de febrero de 2014, dando así inicio formal a la ejecución del proyecto adjudicado vía licitación pública.

El presente reporte, corresponde al Informe Final Borrador del proyecto "Línea Base Glaciológica del Sector Norte de Campo de Hielo Sur: Glaciares Jorge Montt, Témpano y O`Higgins", en el que se da cuenta de todas aquellas materias indicadas en el numeral 5.3 "Informe Final Borrador" de las Bases Técnicas de Licitación, y de lo señalado en el numeral 13 del Convenio Ad-Referendum Modificatoria II de fecha 08 de octubre de 2015, reportando para todos los efectos los resultados finales y actividades realizadas durante todo el período de ejecución del proyecto comprendido entre el 23 de febrero de 2014 y el 30 de septiembre de 2016. Al momento de presentación del presente Informe Final Borrador, el CECs ha entregado dentro de los plazos establecidos, 5 Informes de Avance Parcial, en los que se dio cuenta cabal de las actividades

ejecutadas y resultados preliminares para cada una de las actividades indicadas en las Bases Técnicas y en los plazos y formas señaladas en el Convenio y sus modificatorias. Cada uno de los 5 Informes de Avance Parcial fue aprobado por la DGA, mediante resolución de la Inspección Fiscal, encontrándose a la fecha del presente Informe Final Borrador, todas las materias administrativas cumplidas en forma y fondo.

El objetivo general del proyecto fue el realizar mediciones glaciológicas en la meseta norte de Campo de Hielo Sur (CHS) incluyendo las áreas acumulación y ablación de los glaciares en estudio, junto con implementar y mantener infraestructura de soporte para la realización de mediciones glaciológicas y meteorológicas comparadas entre las fachadas occidental y oriental del sector norte de CHS.

En relación a los objetivos específicos del proyecto, contemplaron la realización de una recopilación bibliográfica de Campo de Hielo Sur (CHS) para definir la línea de base actual y caracterizar el conocimiento glaciológico de la zona; mediciones de espesor de hielo mediante técnicas geofísicas que aseguren la captura de datos en condiciones de hielo temperado en la meseta Norte de CHS y en los glaciares Jorge Montt, Témpano y O´Higgins; caracterización del manto nival de la meseta norte mediante el uso de radar de penetración terrestre determinando la acumulación anual de nieve; mantención y revisión de las estaciones meteorológicas fijas ubicadas en los glaciares Témpano y O`Higgins, junto con la implementación una nueva estación en las cercanías del Glaciar Jorge Montt; análisis climatológico de las variables meteorológicas en el entorno de las fachadas occidental y oriental de CHS; determinación de la velocidad en el frente de los glaciares Jorge Montt, Témpano y O`Higgins y en la zona de acumulación de CHS; determinación de cambios de

elevación del sector norte de CHS e instalación y habilitación de tres estaciones glaciológicas en la meseta norte de CHS.

En cuanto a lo señalado en las Bases Técnicas (pág. 56, numeral 5.1 y pág. 59, numeral 5.3) el presente Informe Final Borrador debe dar cuenta de un total de 9 entregables (resultados), considerando además detalle de los aspectos metodológicos, informes finales de los estudios realizados, propuestas para futuros estudios, recomendaciones y mantenciones realizadas a las estaciones. Los entregables del proyecto son:

1. Análisis climatológico de CHS.
2. Línea de base actual de CHS.
3. Mediciones glaciológicas comparadas.
4. Análisis de las variaciones de la columna de agua producto del desprendimiento de témpanos en CHS.
5. Espesor y cambios de elevación de los glaciares en estudio.
6. Caracterización del manto nival y estimación de acumulación anual.
7. Implementación de monitoreo hidro-meteorológico en CHS.
8. Habilitación de Estaciones Glaciológicas en CHS.
9. Talleres de divulgación de actividades y resultados.

Visto todo lo anterior, tanto en el ámbito técnico como administrativo, el proyecto se desarrolló sin dificultades mayores, de acuerdo a la planificación realizada para cada una de las actividades señaladas en las bases técnicas, destacando que pese al desafío logístico y operativo que representó la ejecución de actividades científicas complejas en un territorio particularmente extremo en cuanto a sus condiciones meteorológicas, las que limitaron y condicionaron la oportunidad de operar en la zona, finalmente el proyecto se haya ejecutado de manera segura, exitosa, sin

incidentes, destacando el cumplimiento de las tareas y labores asumidas por el equipo de profesionales y técnicos del CECs, en coordinación con las respectivas contrapartes administrativas y técnicas de la DGA.

De igual manera, como parte del presente Informe Final Borrador, se presenta un respaldo digital que incluye 266 archivos RAW y procesados de radar; 117 archivos RAW y procesados de LiDAR; 128 archivos de fotos de implementación de estaciones glaciológicas; 954 archivos de estaciones meteorológicas; 407 imágenes de terreno; 36 imágenes satelitales; 1 bitácora; copia digital de cada uno de los 5 Informes de Avance aprobados por DGA; Acta de entrega a DGA de 4 motos de nieve y copia digital del Informe Final Borrador.

2 Estudio climatológico de las fachadas oriental y occidental de la zona norte de Campo de Hielo Sur

2.1 Resumen

Se presenta el análisis climatológico y meteorológico de la fachada oriental y occidental de la zona norte de Campo de Hielo Sur, elaborado en distintas escalas espaciales y temporales, y con datos provenientes de diversas fuentes: observaciones directas, modelos y re-análisis. De acuerdo a los antecedentes disponibles, las condiciones climáticas en esta zona estarían determinadas por la circulación dominante de vientos del Oeste y el paso de sistemas frontales de latitudes medias y su interacción con la topografía montañosa de la zona. La información obtenida a partir de los datos provenientes de las nuevas estaciones meteorológicas implementadas durante la ejecución del presente trabajo, muestra contrastes espaciales fuertes a escala regional, siendo las variables meteorológicas con mayores diferencias entre la fachada oriental y occidental, las de humedad relativa y radiación solar incidente, las que evidencian mayor sequedad del aire y menores montos de nubosidad en el sector oriental en relación al occidental. Al mismo tiempo, del análisis de datos de temperatura del aire, se observa que el sector oriental tiene una mayor temperatura promedio, que el margen occidental. Estas diferencias tendrían implicancia directa en el comportamiento de los glaciares, condicionando, entre otras cosas, que las lenguas terminales de los glaciares orientales, a pesar de encontrarse a mayor altura, muestren tasas de derretimiento similares a las de los glaciares del sector occidental que se encuentran al nivel del mar.

2.2 Introducción

Con el objetivo de analizar las condiciones meteorológicas en la zona de Campo de Hielo Sur (CHS) y caracterizar las diferencias entre sus márgenes oriental y occidental, se realizó el análisis climatológico considerando datos obtenidos a partir de las estaciones meteorológicas implementadas durante la ejecución del presente proyecto, como la información proveniente de la red hidro-meteorológica de la Dirección General de Aguas (DGA) instalada con anterioridad al proyecto, datos grillados de modelos regionales de diversa naturaleza y datos de re-análisis NCEP-NCAR [*Kalnay et al.*, 1996], ampliamente utilizados en la literatura de la ciencias atmosféricas. Los datos grillados y de re-análisis fueron utilizados considerando sus limitaciones, dado que representan una estimación de escala regional de las condiciones climatológicas, las que no consideran la topografía de detalle ni características de la superficie, entre otras limitaciones.

Se muestra en primer término el contexto climatológico a escala regional con información de temperatura y precipitación, además de los aspectos teóricos que explican la variabilidad climática en la región y el análisis de la tendencia de la temperatura del aire con datos de re-análisis NCEP-NCAR. Posteriormente, se presentan los datos diarios de las estaciones implementadas tanto en la zona baja como en la meseta de la zona norte de CHS y el modelo de derretimiento.

2.3 Objetivos

2.3.1 Objetivo general

Conocer la relación existente entre factores meteorológicos para la fachada oriental y fachada occidental de CHS, caracterizando las condiciones atmosféricas de la zona norte de CHS en distintas escalas espaciales y temporales.

2.3.2 Objetivos específicos

- Describir las condiciones climáticas imperantes en la zona norte de CHS.
- Determinar las tendencias climáticas de la temperatura del aire y de la precipitación, utilizando datos modelados, re-análisis e información proveniente desde estaciones meteorológicas localizadas en torno al Campo de Hielo Sur.
- Determinar las condiciones meteorológicas de los últimos dos años con datos de seis estaciones meteorológicas implementadas en los alrededores y sobre los glaciares del norte de CHS, durante la ejecución del proyecto.
- Determinar las diferencias meteorológicas espaciales en el periodo de ablación a partir de los datos de las estaciones meteorológicas.
- Confección de un modelo para la estimación del derretimiento para el periodo de ablación del sector norte de CHS.

2.4 Materiales y Métodos

Para el análisis climatológico de la fachada oriental y occidental de la zona norte de CHS se utilizaron datos meteorológicos previos al inicio del presente proyecto, datos meteorológicos provenientes de las estaciones de CHS y un modelo de balance de masa glaciar para la estimación de derretimiento.

2.4.1 Datos climatológicos previos

Para la caracterización climática y sinóptica de la zona, así como la tendencia de cambio climático previa a la fecha de inicio del proyecto, se utilizaron las herramientas de análisis de exploradores climáticos KNMI del Instituto de Meteorología de Holanda [*Instituto de Meteorología de Holanda*, 2016] y el recientemente desarrollado explorador CR2 del Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia [*Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia*, 2016], los cuales recopilan la información de variables meteorológicas que abarcan la red de la DGA y de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC).

El análisis climático consideró dos fuentes de datos: re-análisis NCEP-NCAR [*Kalnay et al.*, 1996], que comprende un proceso de asimilación de observaciones y modelos climatológicos; y datos del *Climatic Research Unit* (CRU 3.1.) de la *University of East Anglia* [*University of East Anglia*, 2016], que corresponde a una grilla de 0.5° derivada de observaciones de estaciones meteorológicas.

2.4.2 Datos climatológicos obtenidos en Campo de Hielo Sur.

Para el análisis climatológico de la fachada oriental y occidental de la zona norte de CHS, el proyecto contempló seis estaciones meteorológicas, tres implementadas en los alrededores (periferia) y tres en la meseta o *plateau* (Figura 2.1). De las estaciones de periferia (Tabla 2.1), dos fueron instaladas por la DGA previo al inicio del presente proyecto, correspondiendo a las estaciones Glaciar O´Higgins y Glaciar Témpano. En mayo de 2014 el equipo de profesionales del Centro de Estudios Científicos (CECs) implementó la tercera estación en la periferia del Glaciar Jorge Montt.

Los datos provenientes de estas tres estaciones, además de ser transmitidos automáticamente en tiempo real a la red hidrométrica de la DGA (Figura 2.2), fueron descargados desde sus respectivos *dataloggers*.

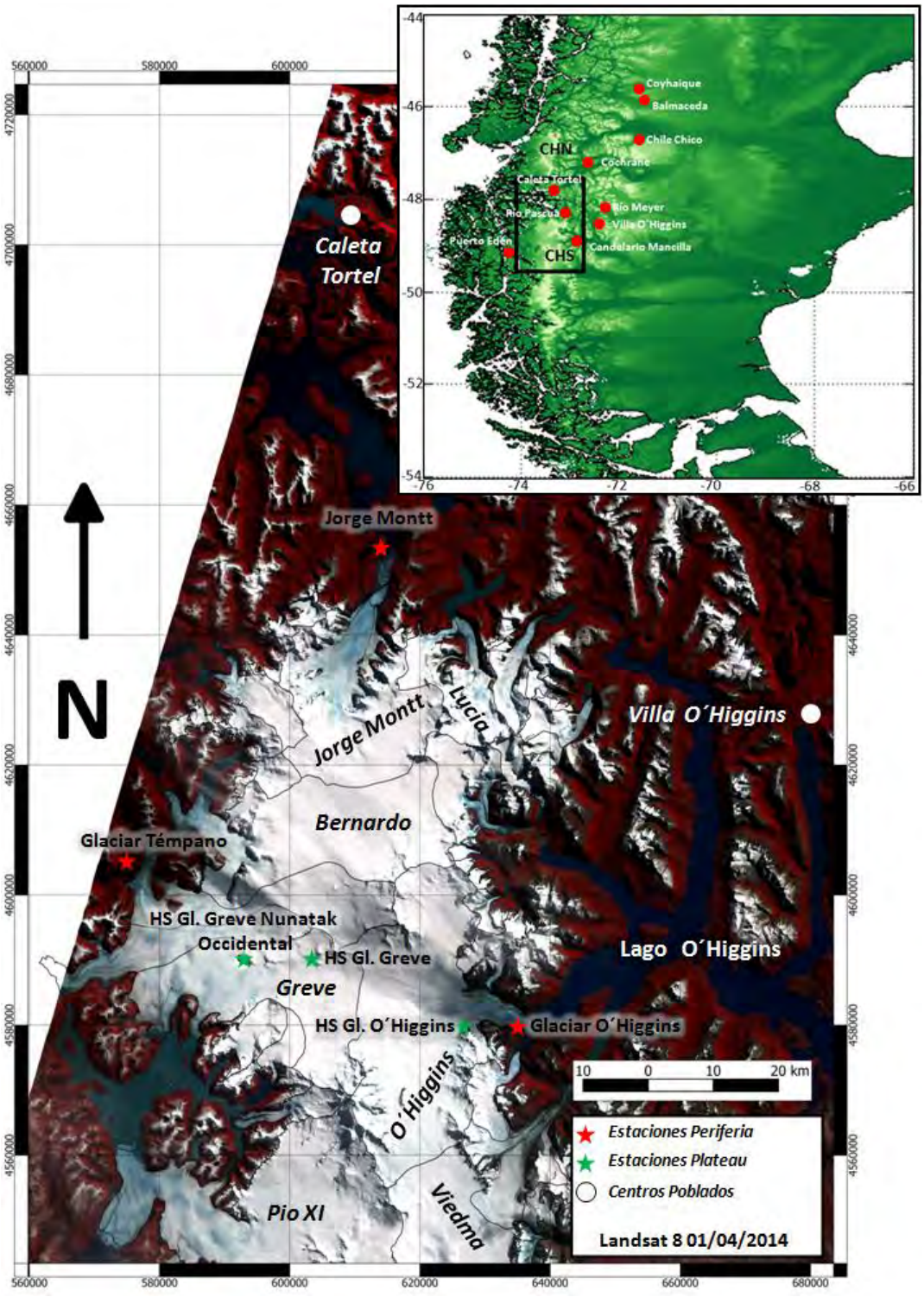


Figura 2.1 Localización de las estaciones meteorológicas de periferia y meseta (*plateau*) de Campo de Hielo Sur. Inserto muestra localización de otras estaciones meteorológicas analizadas en este informe.



Figura 2.2 Variables meteorológicas obtenidas desde el sistema de adquisición de datos de la DGA para las tres estaciones de periferia.

Tabla 2.1 Información general de las estaciones meteorológicas de periferia.

Estación Meteorológica	Código BNA	Inicio de operaciones	Latitud	Longitud	Altitud (m snm)
Jorge Montt	11800000-5	10-may-14	48°15'13'' S	73°27'35.6''W	193
Glaciar O´Higgins	11706000-4	08-jun-09	48°55'38'' S	73°07'02'W	310
Glaciar Témpano	12000000-4	31-dic-08	48°50'05'' S	74°10'59'W	50

El periodo de datos analizados para las estaciones O´Higgins y Témpano va desde el abril de 2014 hasta junio de 2016, mientras que la estación Jorge Montt desde junio de 2014 hasta junio de 2016. Debido a las condiciones extremas donde se encuentran ubicadas las estaciones, los sistemas de alimentación y sensores de las mismas, no funcionaron en forma permanente, existiendo algunos vacíos en la captura de datos.

Se utilizaron todos los datos descargados desde los *dataloggers* de estas tres estaciones. Para los períodos en que existió un vacío de datos registrados, se utilizaron los obtenidos del sistema web, capturados y transmitidos por cada una de las estaciones. Los datos capturados por la estación y transmitidos al sistema web no muestran diferencias estadísticamente significativas con aquellos datos capturados directamente desde los *dataloggers*. Para los datos de temperatura del aire y humedad relativa en la estación Témpano se muestra la información a partir del 29 de mayo de 2015, fecha en que se reemplazó el sensor defectuoso.

Además de las tres estaciones meteorológicas de periferia ya descritas, el CECs implementó tres estaciones en la zona de meseta de CHS (Tabla 2.2), las que han sido dispuestas en afloramientos rocosos (‘*nunataks*’).

Tabla 2.2 Información general de estaciones meteorológicas de meseta.

Estación Meteorológica	Código BNA	Inicio de operaciones	Latitud	Longitud	Altitud (m snm)
Hielo Sur en Glaciar Greve	12020000-3	01-oct-14	48°49'55'' S	73°34'53''W	1428
Hielo Sur en Glaciar Greve, Nunatak Occidental	12020001-1	04-oct-15	48°49'59'' S	73°43'25''W	1040
Hielo Sur en Glaciar O'Higgins	11706001-2	16-oct-15	48°55'28'' S	73°16'26''W	1234

La totalidad de los datos requeridos para el análisis climatológico, a partir de los registros de las tres estaciones de meseta CHS, fueron obtenidos mediante la descarga directa desde los *dataloggers* de cada estación, permitiendo así contar con información más detallada que aquella

disponible en el sistema web, el que finalmente, pese a estar parcialmente disponible, no fue utilizado. La estación Hielo Sur en Glaciar Greve tiene todos sus datos en el sistema web, mientras que las dos estaciones restantes presentaron sólo las observaciones de temperatura del aire y precipitación en el sistema web, a la fecha de redacción de este informe (septiembre de 2016).

Para las estaciones meteorológicas tanto de periferia como de meseta, se analizó la calidad de los datos con la finalidad de realizar la validación técnica de los mismos. En general los datos erróneos encontrados se deben a las condiciones meteorológicas adversas en que operan las estaciones meteorológicas, situación particularmente extrema para la estación meteorológica Greve, donde los sensores se congelan. A raíz de lo anterior, los datos erróneos −originados por las condiciones meteorológicas ya indicadas- son eliminados de la base de datos para el análisis climatológico de CHS. Sin perjuicio de lo anterior, un criterio de validación utilizado correspondió a la variable de humedad relativa, en el que para algunos registros presentó valores sobre 100%, reemplazándose por el valor máximo posible, es decir, 100%. Finalmente para fines descriptivos, comparativos y de análisis (objetivo central del análisis climatológico de CHS del presente proyecto), se utilizaron promedios diarios de las variables meteorológicas. Para la dirección del viento y la precipitación se utilizaron los valores instantáneos.

Tal como para las estaciones de periferia, se analizaron los datos para cada una de las variables meteorológicas observadas, con el objetivo de caracterizar y comparar las condiciones meteorológicas en los glaciares de la zona norte de CHS. Esto permite establecer las diferencias entre la meteorología de la fachada occidental (Hielo Sur en Glaciar Greve Nunatak Occidental) y la fachada oriental (Hielo Sur en Glaciar O'Higgins) además

de una zona de transición entre dichas estaciones (Hielo Sur en Glaciar Greve) (Figura 2.1).

2.5 Análisis Climatológico de CHS

La zona norte de CHS se encuentra situada en torno al eje de los 48º a 49°S en el núcleo de los denominados vientos del Oeste (‘*westerlies*’), correspondiendo a un sector fuertemente influenciado por el paso de sistemas frontales (‘*stormtrack*’) asociados a perturbaciones ciclónicas que se generan sobre el Océano Pacífico Sur (Figura 2.3). La zona cuenta con un número limitado de estaciones meteorológicas [*Garreaud et al.*, 2013] que no logran representar a cabalidad las condiciones meteorológicas y climatológicas, especialmente a mayores altitudes.

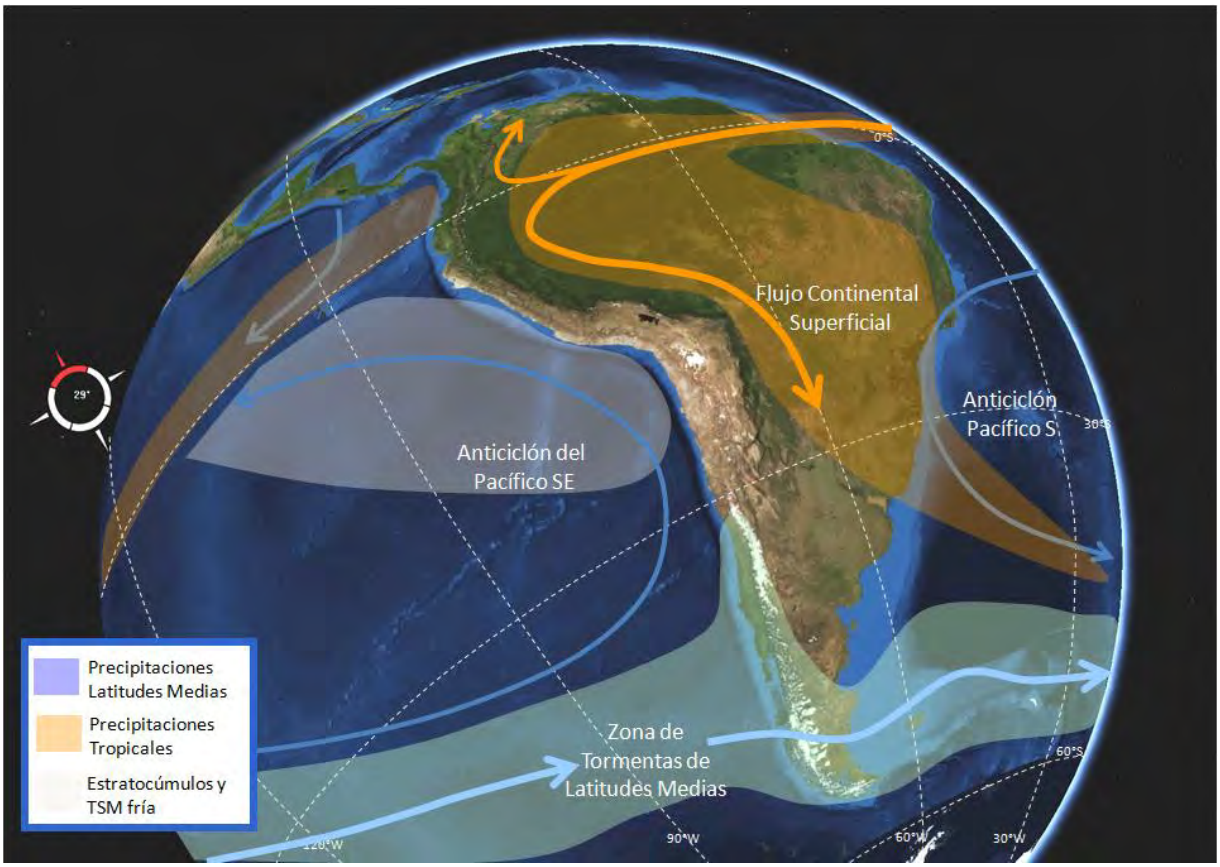


Figura 2.3 Contexto general de patrones de circulación para Sudamérica.

El sector norte de CHS está caracterizado por una marcada estacionalidad intranual en las temperaturas, con valores mínimos en los meses de invierno, tal como lo muestra la Figura 2.4, elaborada con datos NCEP-NCAR de re-análisis, incluyendo la distribución anual de la temperatura promedio mensual para el período 1948-2013 en la zona norte de Campo de Hielo Sur. Los datos corresponden al nivel isobárico de 850 hPa, es decir aproximadamente 1500 m snm que equivale a la altitud promedio en esta zona. Se puede apreciar el ciclo anual con menores temperaturas en agosto y mayores temperaturas en febrero. Todos los meses muestran en sus rangos temperaturas promedio positivas, exceptuando agosto donde las temperaturas positivas representan un 2.5%.

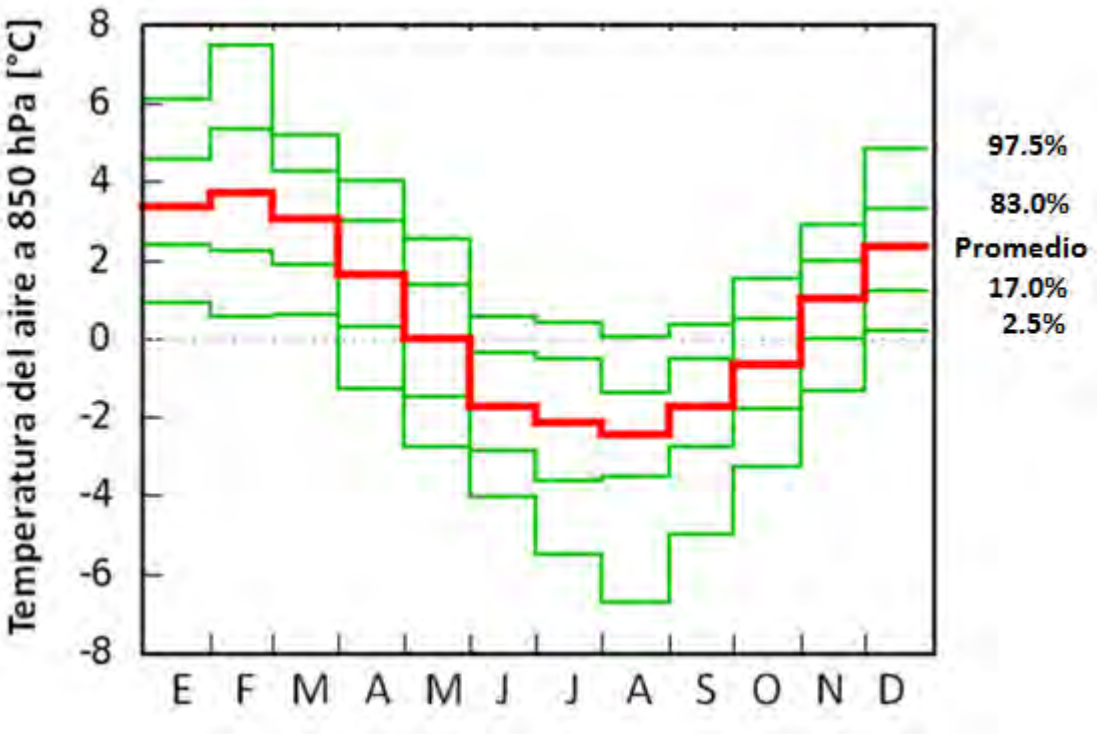


Figura 2.4 Temperatura del aire a ~1500 m snm sobre el cuadrante norte de CHS. Línea roja indica el promedio de las temperaturas mensuales y líneas verdes los percentiles indicados en la figura.

Los datos del *Climate Research Unit* (CRU 3.1) que se aprecian en el inserto de la Figura 2.5 [*Sagredo and Lowell*, 2012], confirman dicha estacionalidad en las temperaturas.

Por el contrario, las precipitaciones se muestran temporalmente distribuidas solo con leves máximos hacia los meses de marzo y abril, de acuerdo a los datos CRU 3.1 (inserto, Figura 2.5) [*Sagredo and Lowell*, 2012], sin embargo corresponde a una zona de transición en el comportamiento intranual en las precipitaciones ya que inmediatamente al norte se aprecia estacionalidad en las precipitaciones, de acuerdo a la clasificación climática de los glaciares en los Andes de Sagredo & Lowell (2012).

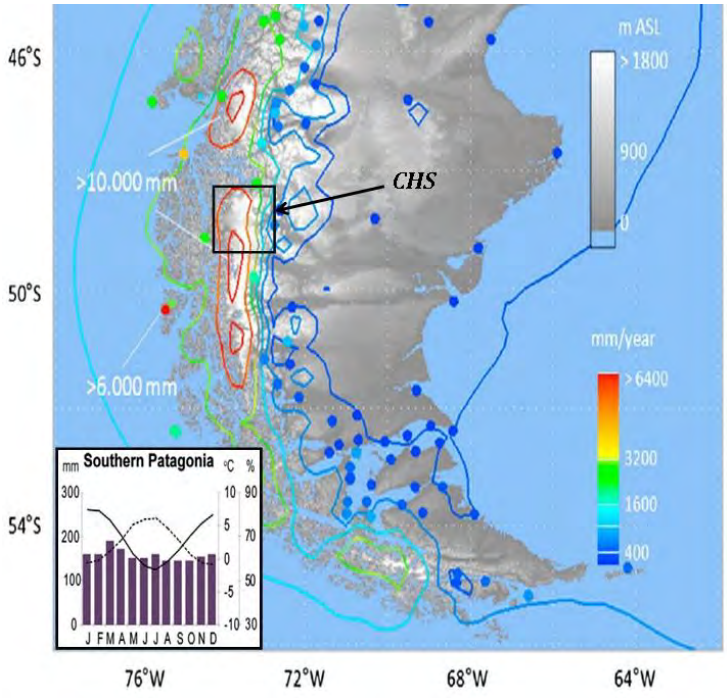


Figura 2.5 Precipitación anual (contornos de colores) obtenida de los datos del modelo climático regional PRECIS-DGF (~25 km) (Garreaud et al., 2014). Inserto corresponde a la climatología de los glaciares ubicados en Campo de Hielo Sur y que, por lo tanto, contienen a los glaciares del área de estudio. Barras corresponden a las precipitaciones mensuales, línea segmentada corresponde a la humedad relativa (escala a la derecha) y línea continua a los valores de temperatura en °C [*Sagredo and Lowell*, 2012]**.**

La distribución longitudinal de las precipitaciones se encuentra influenciada por la presencia de la Cordillera de los Andes, que a pesar de no alcanzar grandes altitudes, genera una fachada occidental más húmeda que la oriental (Figura 2.6). A nivel regional, las precipitaciones y la componente zonal del viento a 850 hPa, se encuentran correlacionadas positivamente en el sector occidental de los Andes, y negativamente en el sector oriental, debido al efecto mecánico que la cordillera genera, produciendo que el aire ascienda en el sector occidental (barlovento) favoreciendo condiciones para la saturación del aire y, por ende, la ocurrencia de precipitaciones y subsidencia del aire e inhibición de las precipitaciones en el sector oriental (sotavento) [*Garreaud et al.*, 2013]. Como consecuencia de ello, las precipitaciones de acuerdo al modelo regional PRECIS-DGF, pueden

alcanzar 10,000 mm en el lado occidental (Figura 2.6) y de aproximadamente 300 a 400 mm en el lado oriental, siendo esta zona uno de los mejores ejemplos de precipitación orográfica y efecto sombra de precipitaciones [*Smith and Evans*, 2007].

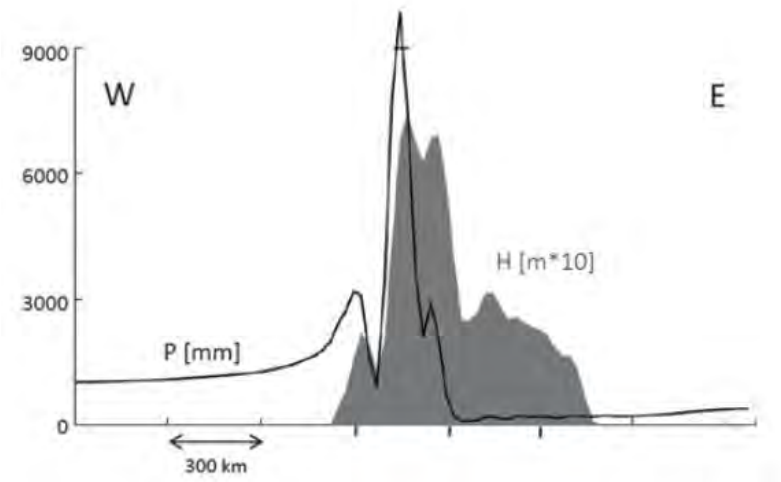


Figura 2.6 Perfil longitudinal promedio la precipitación promedio anual de datos PRECIS-DGF (línea negra en [mm] escala a la izquierda) entre aproximadamente los 42°S y 52°S. Elevación del terreno corresponde al sombreado gris, escala en la izquierda (m *10) [*Garreaud et al.*, 2013].

En cuanto a la variabilidad interanual, esta zona se encuentra influenciada por las condiciones a escala sinópticas y la circulación del océano en el Pacífico Sur. Los patrones de circulación sinópticas responden a modos y patrones climáticos de gran escala como el Modo Anular del Sur (SAM) u Oscilación Antártica (AAO), El Niño Oscilación del Sur (ENSO) y la Oscilación Interdecadal del Pacífico (IPO), los cuales determinan la variabilidad interanual de la precipitación y la temperatura en ambas regiones (Garreaud et al., 2013). Específicamente, el SAM en esta zona tiene un impacto significativo en las temperaturas y precipitaciones, donde SAM positivos (negativos) se asocian a mayores (menores) temperaturas [*Gillett et al.*, 2006] y a una intensificación (debilitamiento) de los vientos

del oeste [*Hall and Visbeck*, 2002] lo cual genera un aumento (disminución) de las precipitaciones en el área de estudio. Esto es particularmente de interés, ya que se ha detectado una tendencia a índices positivos del índice SAM durante la segunda mitad del siglo XX y comienzos del XXI [*Marshall*, 2003] que potencialmente pudiera afectar las características climatológicas y, por ende, la criósfera de la zona.

2.5.1 Tendencias climáticas: antecedentes y datos de modelos

Las precipitaciones en Patagonia son las más altas de Chile, pero sus tendencias de mediano y largo plazo no son muy claras debido al déficit de información, originado en la falta o limitada disposición de estaciones meteorológicas. Aún con esta limitación, Garreaud *et al.* [2013] estiman que ha habido una disminución de las precipitaciones del orden de 300 a 800 mm por década en la zona de Patagonia occidental en el período 1968-2001, lo que sería una de las causas que explicaría el retroceso glaciar al disminuir la acumulación nival. Estos resultados son consistentes con los de Aravena y Luckman [2008], quienes determinaron una disminución en las precipitaciones para Patagonia. No obstante lo anterior, debe considerarse que el análisis de Aravena y Luckman [2008] no incluye estaciones meteorológicas en el lado chileno a la latitud de la zona norte de CHS, por lo que los resultados tienen un carácter más bien regional.

Las temperaturas no presentan una tendencia clara a nivel regional: Falvey y Garreaud [2009] determinan con el promedio multimodelo de CMIP3 del periodo 1972-2000 para la región inmediatamente al norte del área de estudio, un aumento de 0.05 a 0.10 °C/década de la temperatura superficial, mientras que para la tropósfera media (700 a 300 hPa)

determinan un calentamiento del orden de 0.10 a 0.15 °C/década. Lo anterior es similar a lo reportado por Villalba *et al.* [2003] en las estaciones meteorológicas al sur de los 46°S y a lo manifestado por Rasmussen *et al.* [2007] para la zona más austral de CHS.

Los datos de re-análisis NCEP-NCAR obtenidos a mayores altitudes en la zona de Campo de Hielo Sur, muestran una tendencia a mayores temperaturas durante el inicio del siglo XXI (Figura 2.7), estos datos sin embargo deben ser utilizados prestando atención a sus limitaciones, especialmente los anteriores a 1979.

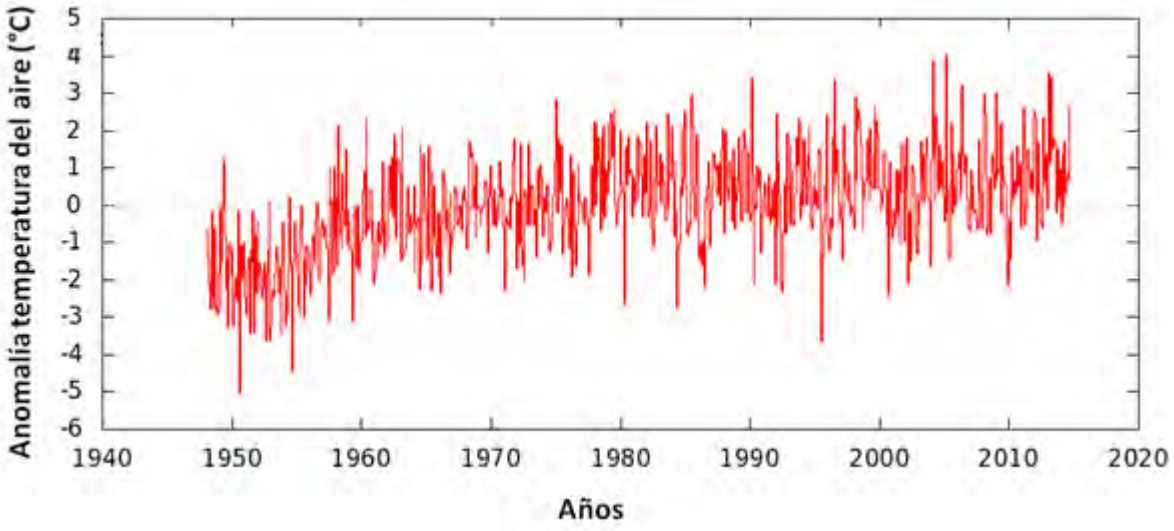


Figura 2.7 Anomalía de las temperaturas del aire para la zona norte de Campo de Hielo Sur en 700 hPa. Datos re-análisis NCEP-NCAR.

A pesar de la clara tendencia a anomalías positivas de temperatura en los últimos años, la estructura temporal de los cambios se muestra más compleja. La Figura 2.8 muestra la regresión lineal de la temperatura NCEP-NCAR a 850 hPa (~ 1500 m snm) para el cono sur de Sudamérica en el periodo 1979-2013. En ella de aprecia que para la zona de Campo de Hielo Sur (~50°S), existen diferencias mensuales, lo cual debe ser considerado para definir los impactos del cambio de temperatura sobre los

glaciares de la región. Los meses de febrero, marzo, abril, mayo y julio son los que presentan un mayor aumento de temperatura, que van de 1.5 a 2.0 °C. Este aumento de temperaturas no solo tiene un impacto directo en el derretimiento, sino que también -y quizás de mayor importancia- implica que la precipitación nival disminuye, dando lugar a precipitación líquida, lo que genera una menor acumulación. De agosto a diciembre el cambio parece ser menor, con valores cercanos a 1.0° C.

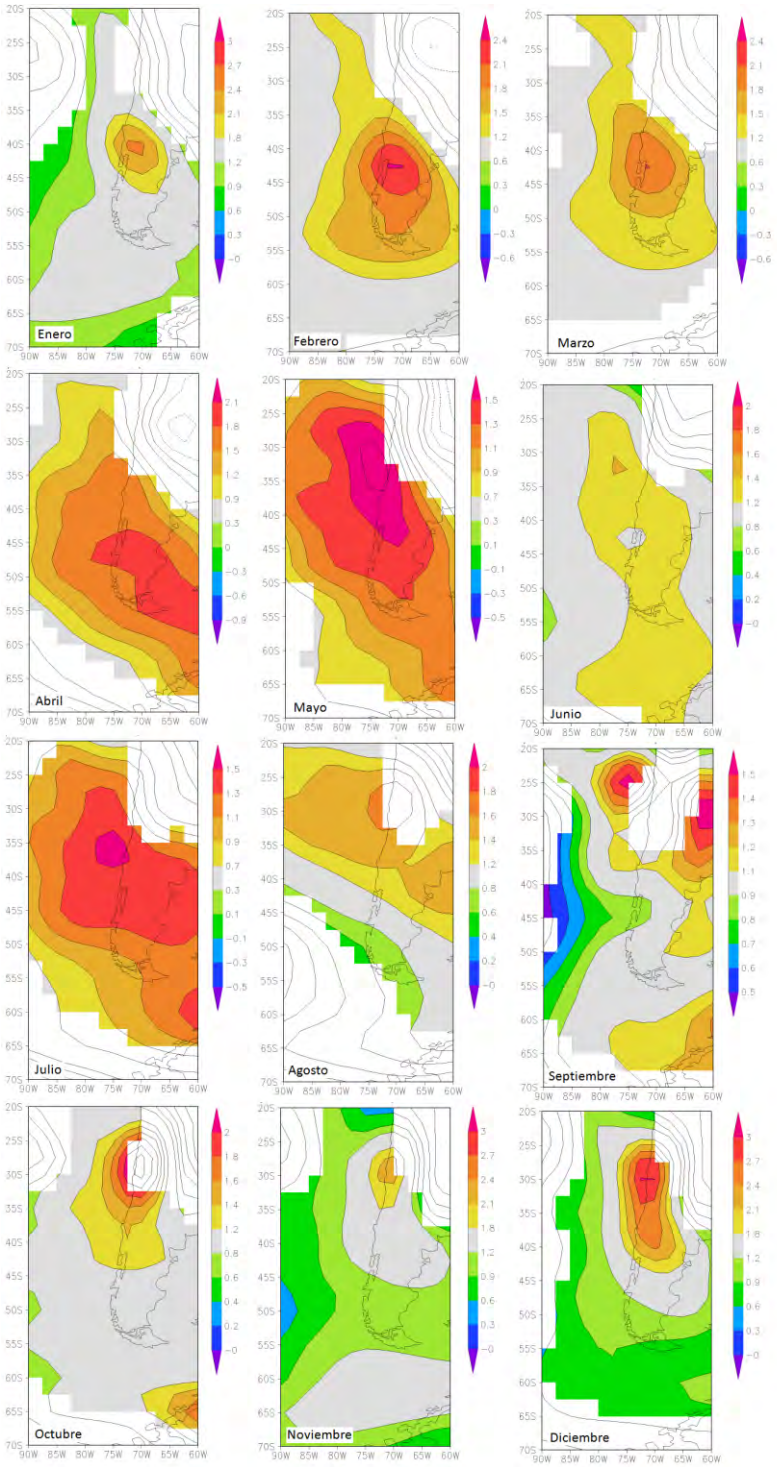


Figura 2.8 Regresión lineal por mes de la temperatura del aire a 850 hPa, correspondiente aproximadamente a 1500 m snm, la altitud del *plateau* de Campo de Hielo Sur. Periodo corresponde a 1979-2013. Las zonas de achurado de colores corresponden a las estadísticamente significativas ($p<0.05$). Escala de colores en °C.

2.5.2 Tendencias climáticas: observaciones

Tal como se dijo, existe un déficit de datos desde estaciones de larga data en la zona norte de CHS. Estas estaciones meteorológicas presentan periodos sin datos (Tabla 2.3) y muchas de ellas no son comparables entre sí. La Figura 2.9 muestra la tendencia de la precipitación decadal entre 1985 y 2015 en siete estaciones pertenecientes a la red hidro-meteorológica DGA y DMC. A partir de la figura y tabla señaladas se aprecian señales contradictorias en los registros de precipitación entre algunas estaciones, lo que representa una limitante para estimar las tendencias y poder contrastarlas con los datos de modelos climáticos.

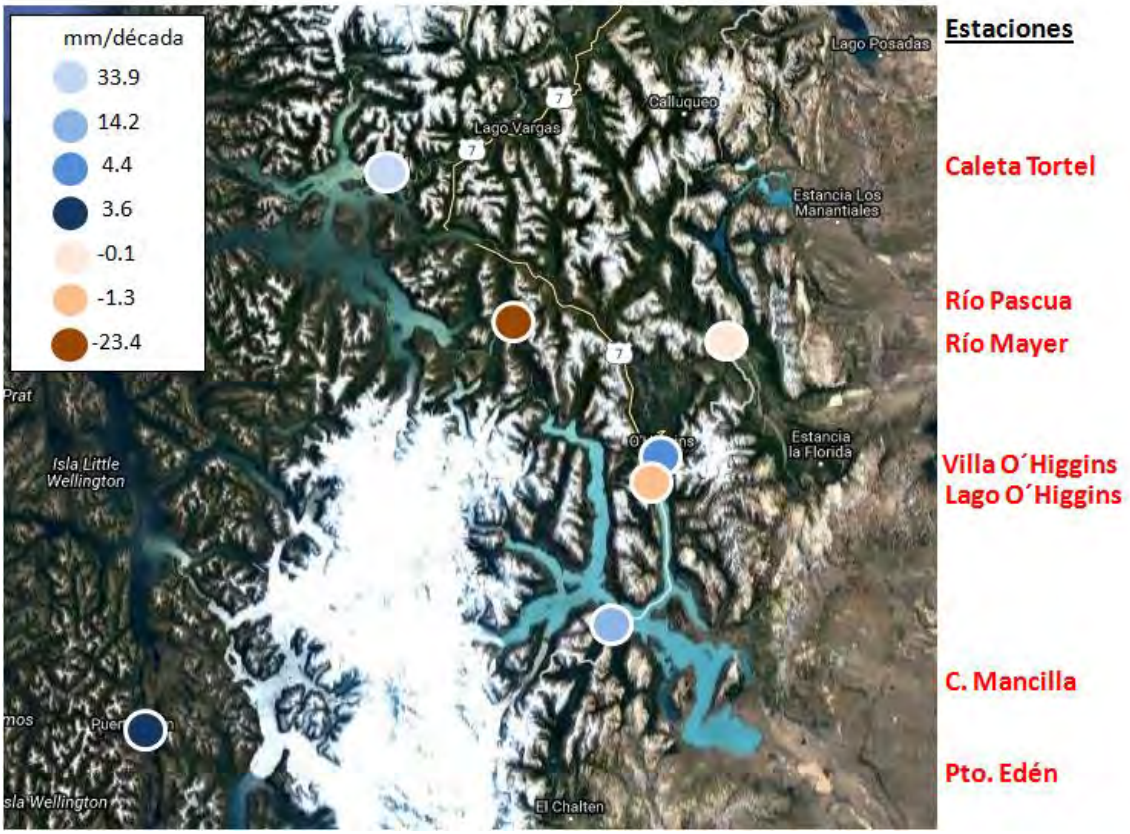


Figura 2.9 Tendencia de la precipitación decadal en estaciones DGA y DMC en la zona norte de Campo de Hielo Sur. Fuente http://explorador.cr2.cl/

Tabla 2.3 Estaciones analizadas para determinar tendencia en precipitación.

Estación	Fuente	% Disponible de datos periodo 1985-2015	Tendencia (mm/ década)
Caleta Tortel	DGA	33	33.9
Rio Pascua ante junta río Quetru	DGA	38	-23.4
Rio Mayer retén	DGA	27	-0.1
Villa O'Higgins subcomisaria	DMC	23	4.4
Lago O'Higgins en Villa O'Higgins	DGA	36	-1.3
Candelario Mancilla	DGA	42	14.2
Puerto Edén	DGA	30	3.6

En cuanto a las temperaturas, las estaciones de más larga data se localizan al noreste de Campo de Hielo Sur (inserto Figura 2.1) por lo que su representatividad espacial está limitada a esa zona, sin embargo, se debe rescatar del análisis de la Figura 2.10, una clara tendencia al aumento de temperaturas máximas en el verano. Considerando que estas estaciones están localizadas a distancias máximas entre sí de hasta ~350 km, la similitud en la variabilidad interanual de los datos demuestra una señal regional de cambio climático para el periodo 1961-2008. El aumento de las temperaturas durante el verano tiene implicancias directas en el balance de masa glaciar, ya que el derretimiento debería aumentar. Se debe tener en cuenta que las tendencias en estas estaciones están influenciadas por el salto climático de 1976, que ha sido definido como un cambio de fase en la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO por sus siglas en inglés) [*Jacques-Coper and Garreaud*, 2015].

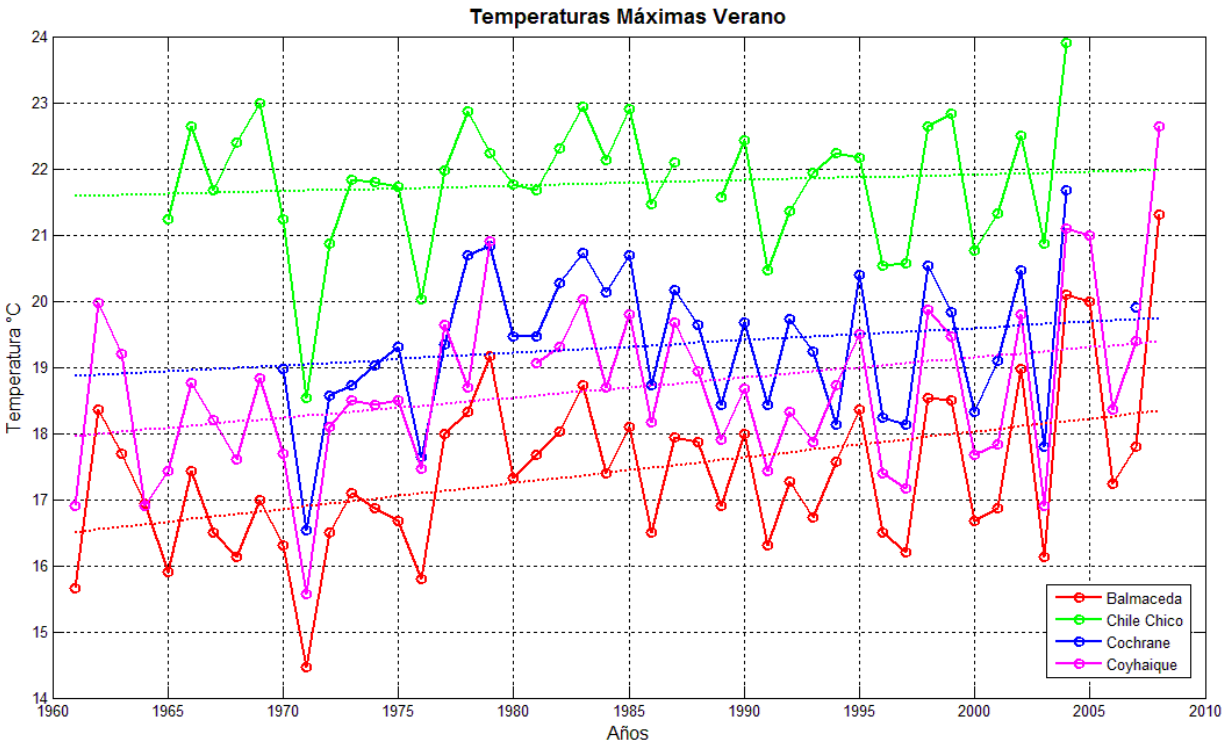


Figura 2.10 Tendencias de temperaturas del aire promedio en verano para las estaciones ubicadas al noreste de Campo de Hielo Sur.

2.6 Análisis Meteorológico

2.6.1 Análisis de estaciones meteorológicas periferia

2.6.1.1 Temperatura del aire

Los datos de temperatura del aire (promedios diarios) de las estaciones periferia O'Higgins, Témpano y Jorge Montt se muestran en la Figura 2.11, en la que se observa el ciclo anual, al que se superpone una alta variabilidad interdiaria. En el periodo común de datos para las tres estaciones se aprecia que existen condiciones más cálidas en la estación del Glaciar O´Higgins y en el Glaciar Jorge Montt, mientras que las condiciones en el Glaciar Témpano se presentan más frías. Esto es principalmente notorio en el primer año hidrológico (2014-2015) analizado. A partir de mayo de 2015 las temperaturas del aire son similares en las tres estaciones. A pesar de que la estación Glaciar O´Higgins se encuentra a mayor altitud respecto a la estación Glaciar Témpano, las temperaturas son mayores en la primera, por lo tanto, si se comparan estaciones a la misma altitud, debiese existir una mayor diferencia en los datos de temperaturas entre ambas estaciones. Del análisis se desprende que la variabilidad interdiaria en las tres estaciones es similar con un coeficientes de correlación de 0.73 (O'Higgins y Témpano), 0.73 (Témpano y Jorge Montt) y 0.82 (O'Higgins y Jorge Montt) (Figura 2.12), lo cual indica que a pesar de las diferencias geográficas (altitud, exposición) las estaciones se encuentran moduladas en su variabilidad por las condiciones sinópticas a escala regional. Respecto de las amplitudes diarias, se ve que no hay grandes diferencias entre los datos de las tres estaciones de la periferia, aunque en Témpano se aprecia una mayor recurrencia con amplitudes mayores que en las otras

dos. La amplitud promedio de Témpano en el periodo de con datos es de 5.6ºC y en O'Higgins es de 5ºC. Esto implica que en Témpano ya se evidencias ciertos signos de continentalidad debido a su localización al interior de un fiordo separado de mar abierto por decenas de km.

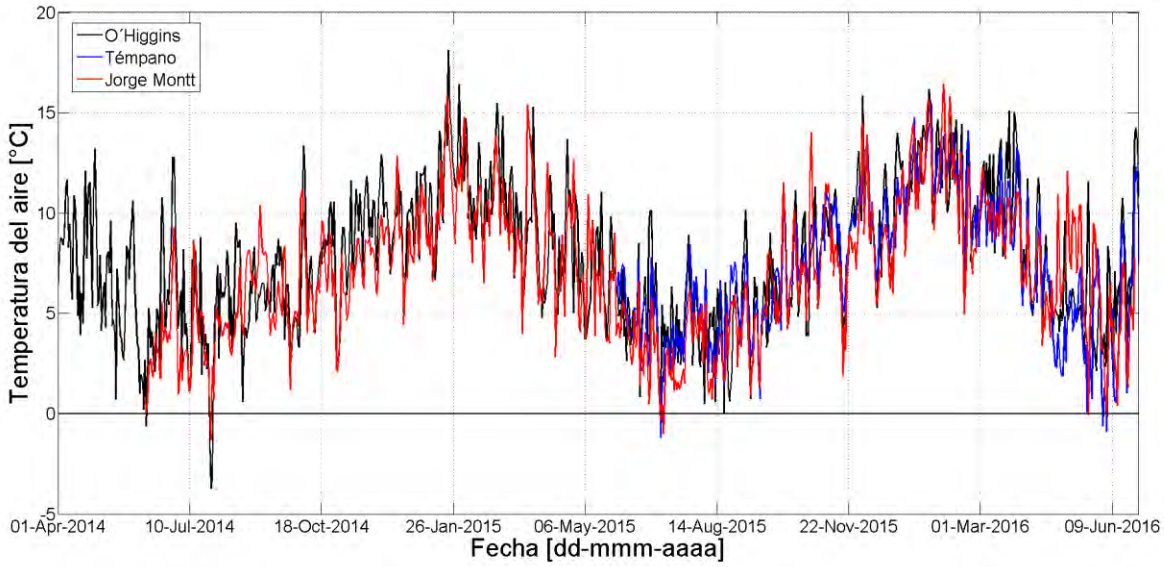


Figura 2.11 Temperatura promedio diaria de las tres estaciones periferia: O'Higgins, Témpano y Jorge Montt.

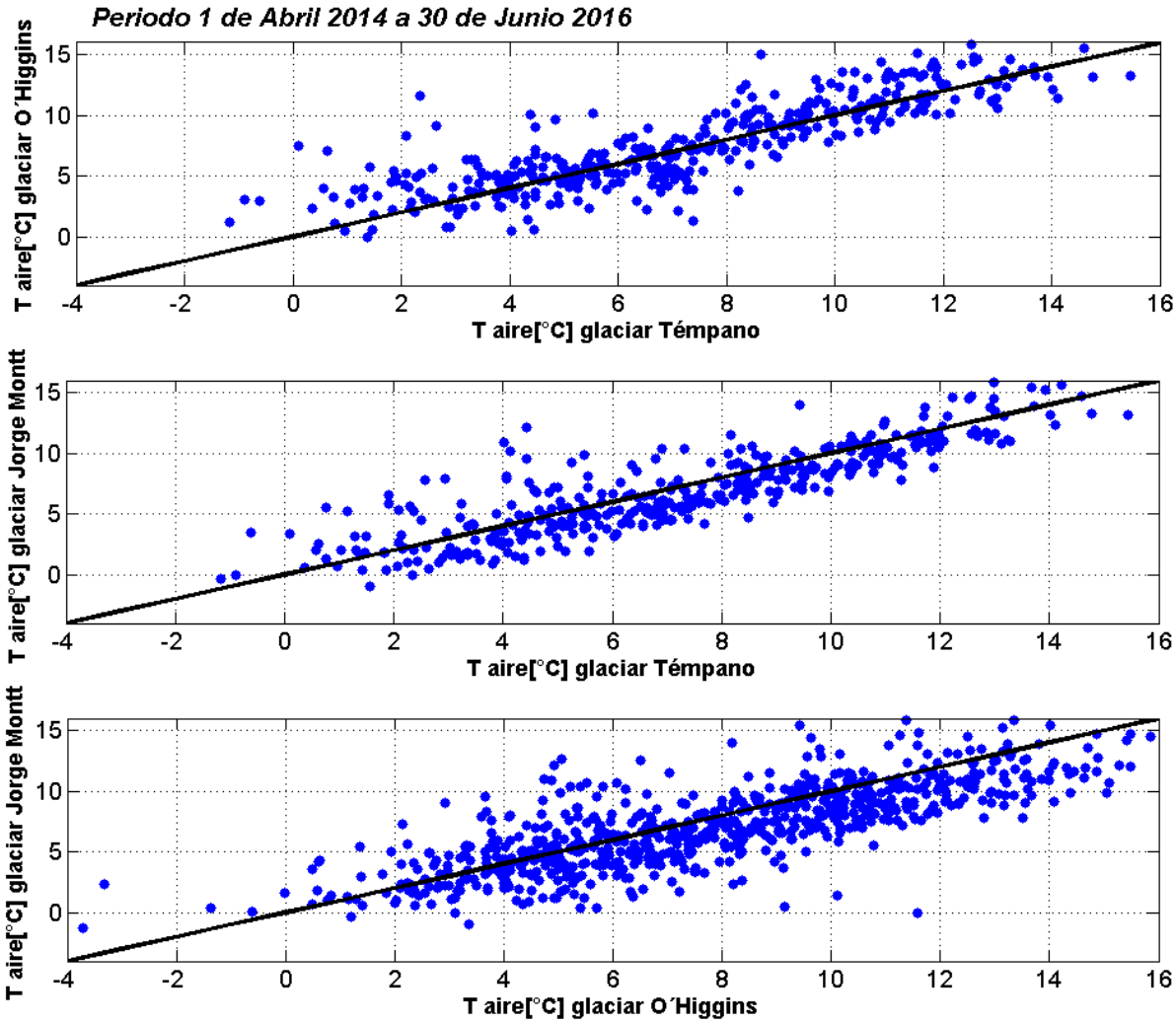


Figura 2.12 Comparación entre los datos promedio diario de la temperatura del aire de las tres estaciones meteorológicas de periferia.

2.6.1.2 Humedad relativa

Los datos de humedad relativa del aire (promedios diarios) de las estaciones periferia O'Higgins, Témpano y Jorge Montt se grafican en la Figura 2.13, detectándose condiciones de mayor sequedad en la estación Glaciar O´Higgins, respecto de las otras dos. A partir de este gráfico se puede observar también que las tres estaciones muestran una importante variabilidad interdiaria. La Figura 2.14 muestra la comparación de los datos de humedad relativa del aire entre las tres estaciones, observándose una alta correlación, con un coeficiente de 0.74, solo entre las estaciones Jorge Montt y Témpano.

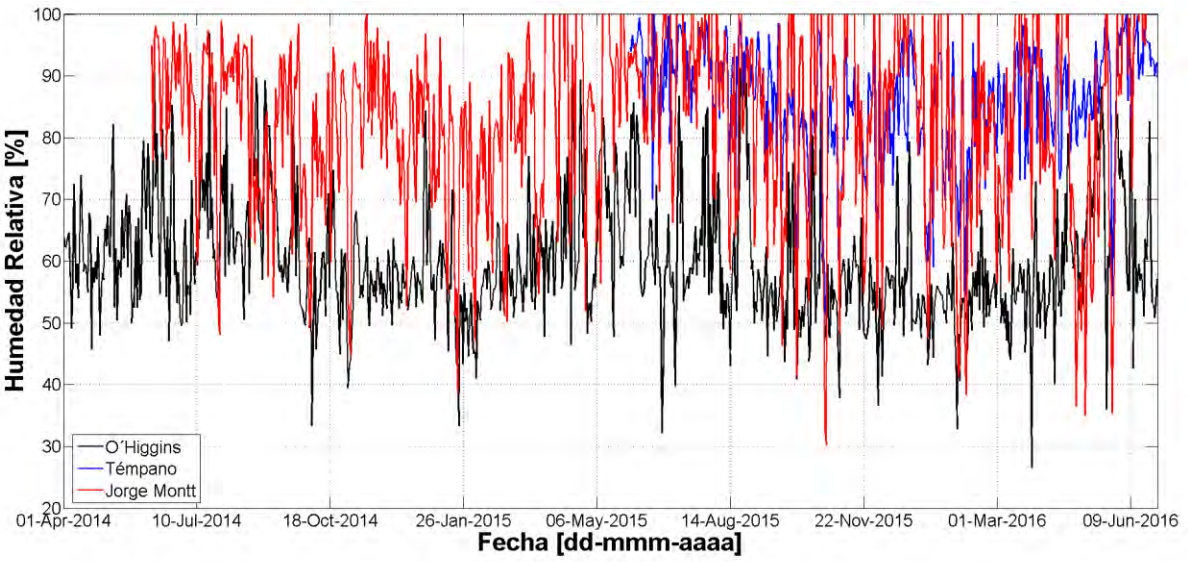


Figura 2.13 Humedad relativa promedio diaria de las tres estaciones analizadas.

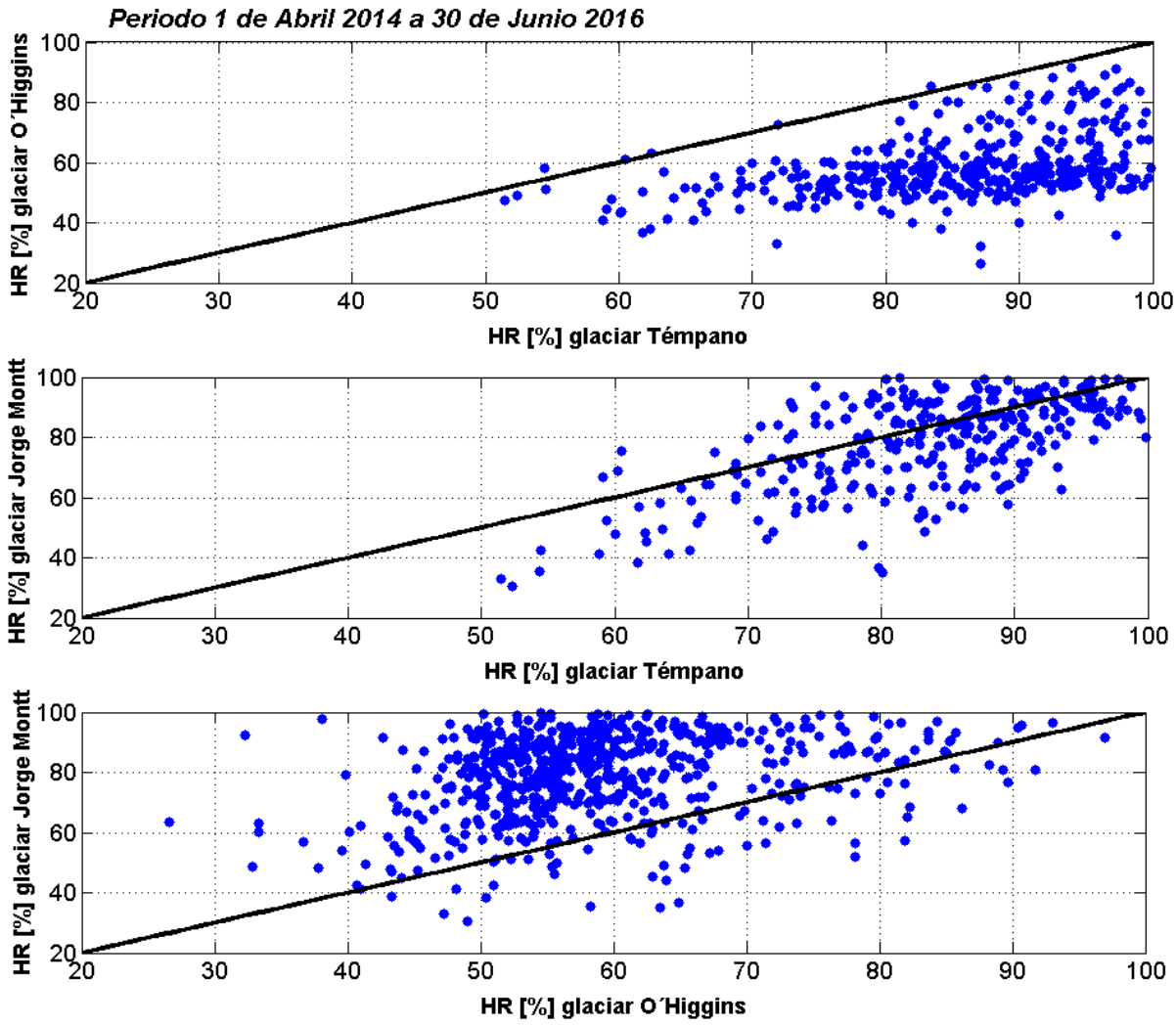


Figura 2.14 Comparación entre los datos promedio diario de la humedad relativa del aire de las tres estaciones meteorológicas de periferia.

2.6.1.3 Presión atmosférica

Los valores observados de presión atmosférica para las tres estaciones de periferia se muestran en la Figura 2.15. La estación Témpano presenta niveles más altos de presión atmosférica, debido a que se encuentra cerca del nivel del mar, a diferencia de la estación O'Higgins que se encuentra en 310 m snm y Jorge Montt, a 193 m snm. Los coeficientes de correlación entre los datos de presión atmosférica de las tres estaciones para el periodo se encuentran entre 0.98 y 0.99, reflejando la modulación de las condiciones de gran escala en la región norte de CHS, la cual se encuentra asociada a las condiciones de circulación en el Océano Pacifico Sur.

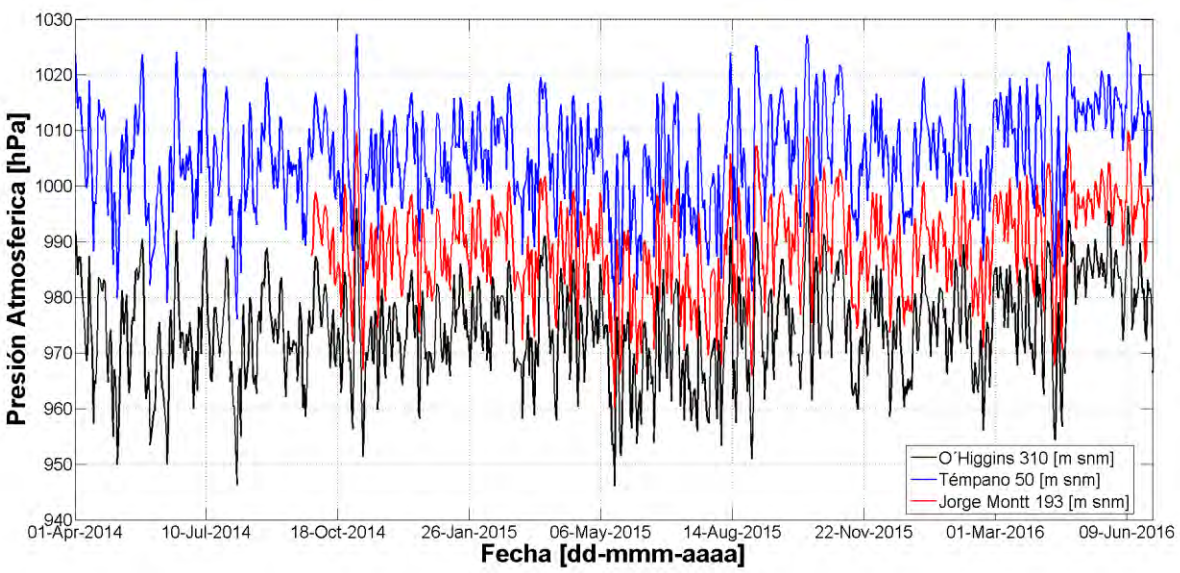


Figura 2.15 Presión atmosférica promedio diaria de las tres estaciones de periferia.

2.6.1.4 Velocidad y dirección del viento

Los datos de velocidad del viento para las tres estaciones se aprecia en la Figura 2.16. Las magnitudes son significativamente mayores en O´Higgins y Jorge Montt por sobre los valores de Témpano.

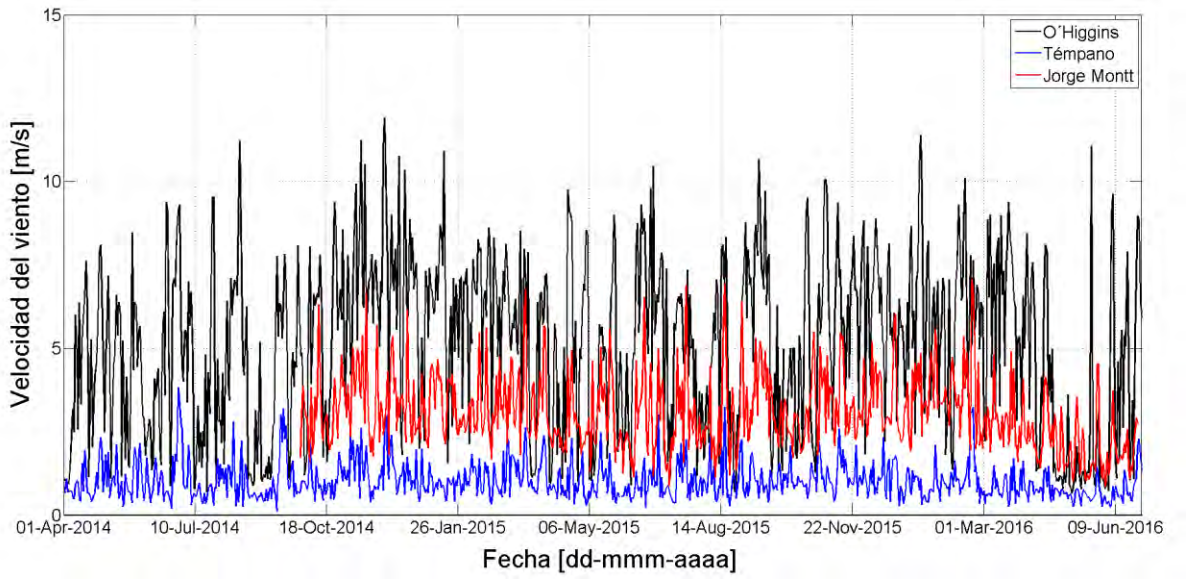


Figura 2.16 Velocidad del viento promedio diaria registradas por las tres estaciones de periferia.

La Figura 2.17 muestra la rosa de los vientos de las tres estaciones, donde se aprecia una predominancia de los vientos en los ejes de los valles. En Jorge Montt, el viento es predominante desde el Sur proveniente del glaciar, y del Noroeste correspondiente a la topografía del fiordo. En Témpano, predominan vientos descendentes desde el Noroeste, correspondiente a la dirección del eje longitudinal del valle donde se ubica la estación. En O´Higgins, el viento predominante es Suroeste, asociado al valle del glaciar Pirámide y también del Noroeste asociado al eje del Glaciar O´Higgins. Por lo tanto, en Jorge Montt y O´Higgins predominan

los vientos catabáticos provenientes desde la superficie de hielo, los que se generan por el contraste térmico que favorece el descenso del aire.

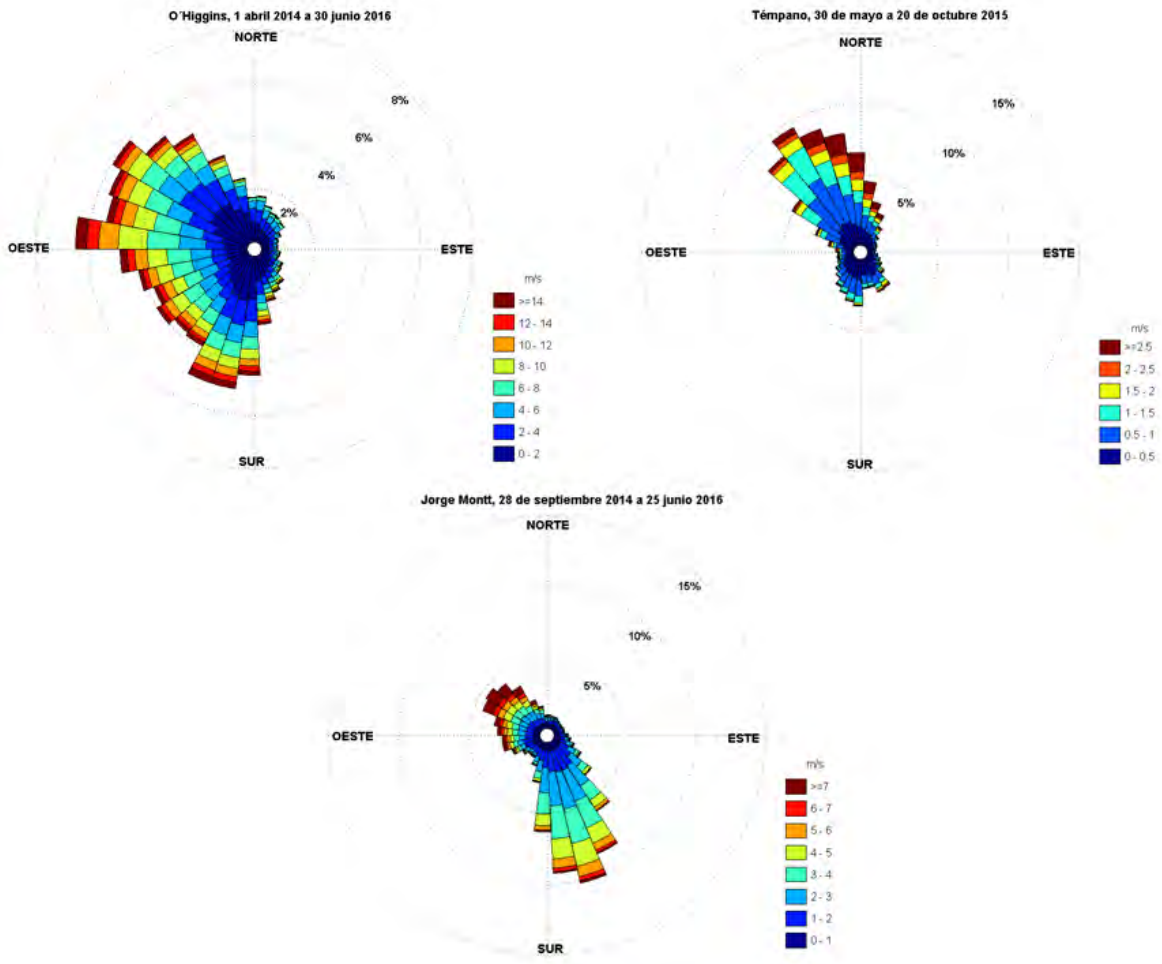


Figura 2.17 Rosa de los vientos: datos obtenidos directamente de las tres estaciones de periferia.

2.6.1.5 Radiación solar incidente de onda corta y radiación incidente de onda larga

Las series de tiempo del promedio diario de la radiación incidente de onda corta para las tres estaciones de periferia se muestran en la Figura 2.18, en que se aprecia el ciclo anual con mayores valores de radiación de

onda corta en el verano que en el invierno, junto con la variabilidad interdiaria asociada a las condiciones sinópticas. Adicionalmente, se presenta la curva de radiación potencial para la localización y altitud de la estación O´Higgins, asumiendo cielos despejados y emisividad de la atmósfera igual a 1, apreciándose que predominan los días con nubosidad, lo cual impide que llegue todo el espectro de la radiación solar, debido a que las nubes reflejan y absorben parte de esta radiación. Esta diferencia es más importante en los meses de verano, mientras que en invierno se aprecian valores promedios diarios más cercanos a la radiación potencial. Como es de esperarse los valores de radiación incidente en Témpano son menores, sugiriendo una mayor cantidad de nubosidad respecto a O´Higgins y Jorge Montt. Esto además es concordante con condiciones más húmedas en la vertiente occidental, expuesta a los vientos del Oeste y al aporte de humedad desde el océano Pacifico, respecto a la vertiente oriental más seca por el efecto Föhn.

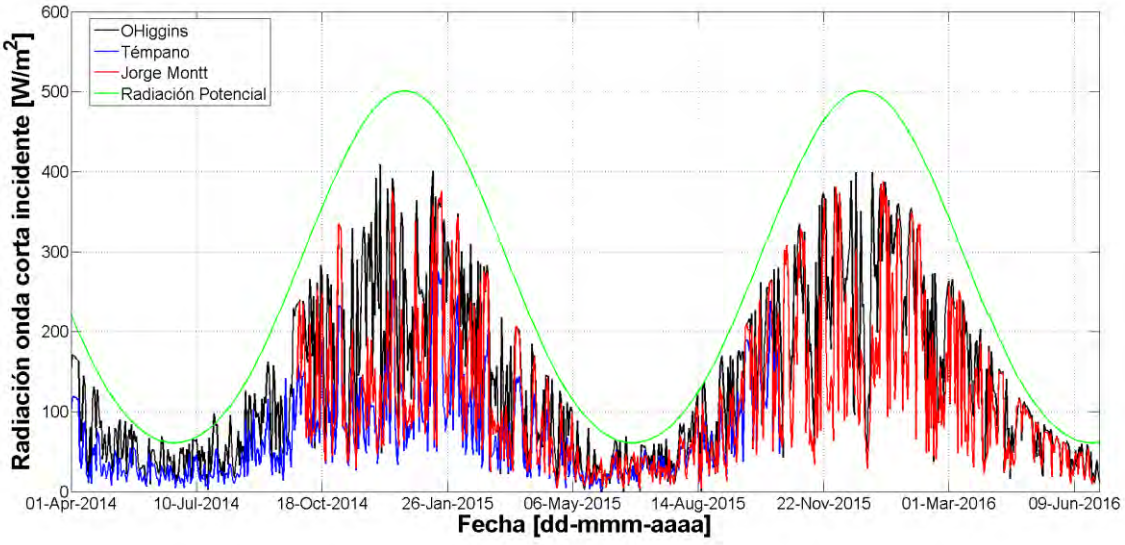


Figura 2.18 Radiación de onda corta en las tres estaciones de periferia. Línea verde indica radiación solar potencial (onda corta) para la localización y altitud de la estación Glaciar O´Higgins. Valores son promedios diarios.

Al evaluar el ciclo diario de la radiación solar para cada una de las estaciones (Figura 2.19), se verifican las mismas condiciones que las indicadas para el ciclo anual.

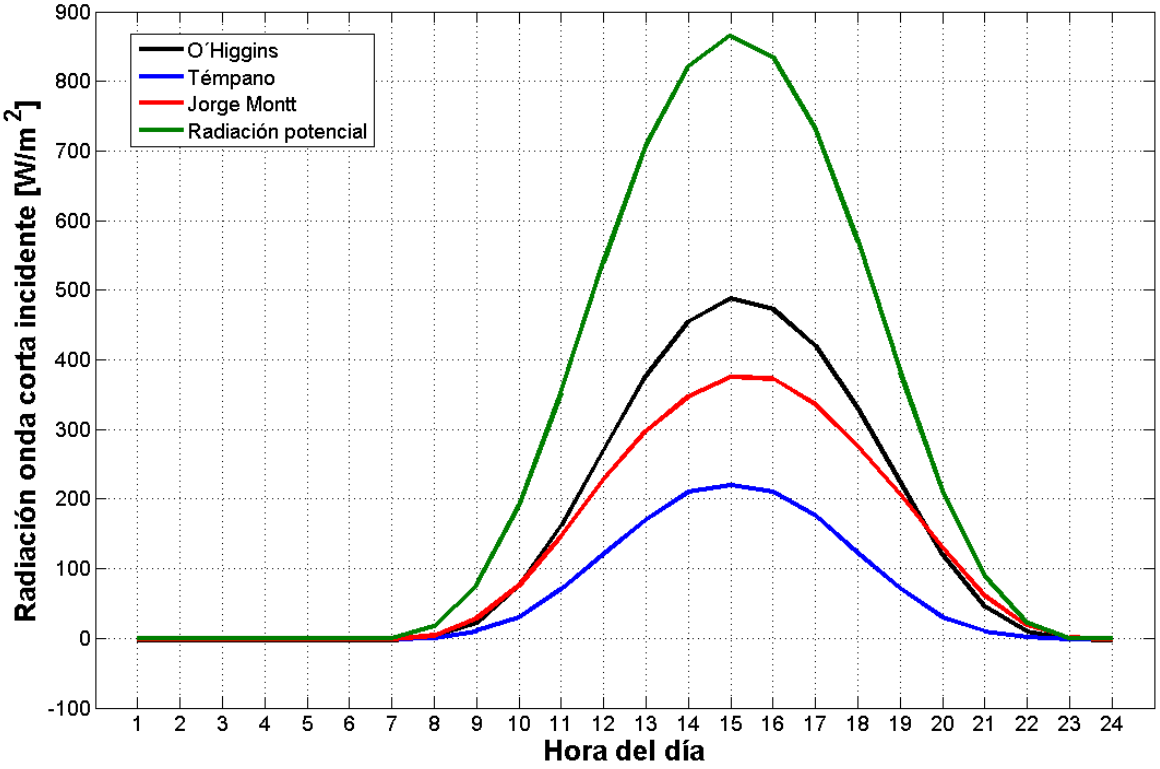


Figura 2.19 Ciclo diario de la radiación solar incidente de onda corta en las tres estaciones de periferia. Como referencia se muestra la radiación potencial estimada para la localización y altitud de la estación O´Higgins.

Los datos de radiación de onda larga deben ser corregidos debido a que el mismo sensor emite radiación hacia la atmósfera lo que distorsionaría la medición, lo que se realiza utilizando la siguiente ecuación:

$$FIR(W/m^2) = NetFIR(W/m^2) + ((5.67 * 10^{-8}\ W/m^2) * T^4) \qquad \textbf{(2.1)}$$

donde NetFIR es lo medido por el sensor que corresponde a valores negativos, FIR es la radiación en el infrarrojo lejano emitido por la

atmósfera y T es la temperatura del sensor. Para las estaciones O´Higgins y Jorge Montt el programa hace la corrección internamente, mientras que para la estación Témpano la corrección se debe realizar manualmente con los datos previos al cambio de sensor, es decir, hasta el 1 de junio de 2015, donde se asume T como la temperatura del aire. El nuevo programa instalado en el *datalogger* de la estación Tempano realiza internamente la corrección.

La radiación de onda larga (Figura 2.20) muestra un leve ciclo anual debido a que es una función de la temperatura del aire (Stefan-Boltzmann), por lo tanto se presentan mayores valores en el verano y menores en invierno. A este ciclo se superpone la variabilidad interdiaria debido a condiciones sinópticas y de nubosidad, al igual que la radiación solar. Estos datos deben interpretarse atendiendo a sus limitaciones ya descritas para la estación Témpano los que hasta el 1 de junio de 2015 fueron corregidos con la temperatura del aire.

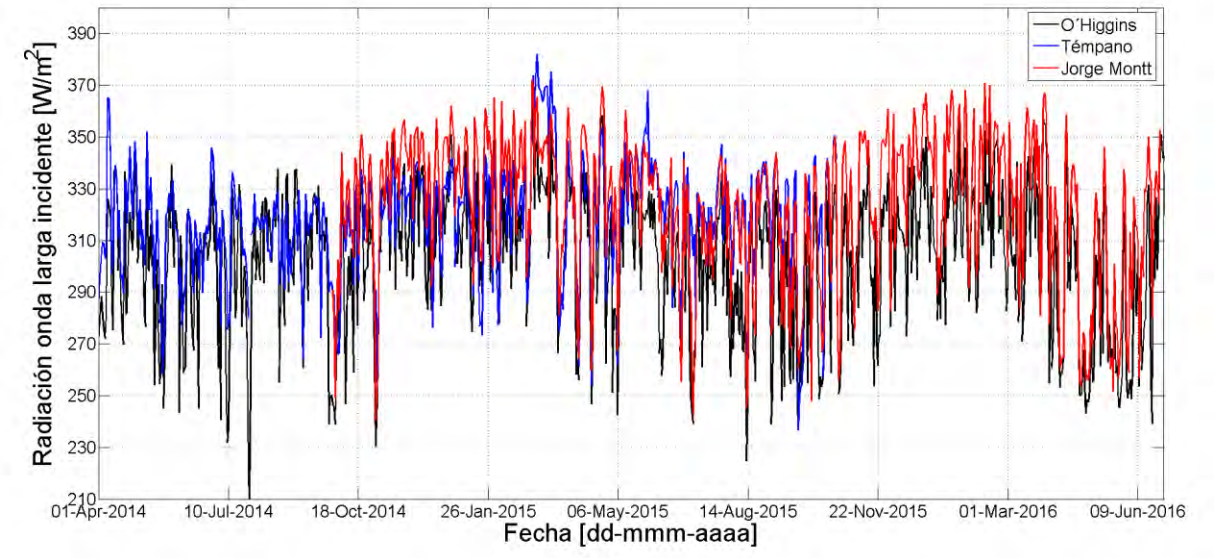


Figura 2.20 Promedio diario de la radiación de onda larga incidente en las tres estaciones de periferia en CHS.

2.6.1.6 Precipitaciones

Las series de datos de valores diarios de precipitaciones se muestran en la Figura 2.21 para las tres estaciones. Debido a que las series de datos presentan vacíos no es posible comparar el total acumulado en el periodo 2014-2016. Para los periodos en común de las tres estaciones, los eventos muestran una mayor cantidad de precipitación en la estación Témpano llegando incluso a un máximo diario superior a los 80 mm. Una menor cantidad de precipitación se aprecia en O´Higgins donde los eventos de lluvia no superan los 5 mm diarios. La variabilidad de las precipitaciones es similar entre O´Higgins, Témpano y Jorge Montt (0.69 coeficiente de correlación), debido a que la ocurrencia de precipitaciones en la zona se debe al paso de sistemas frontales típicos de latitudes medias. En la Figura 2.22 se aprecia a modo de ejemplo lo registrado para el 25 de julio de 2015, día en que se registraron precipitaciones en las tres estaciones, apreciándose dos centros de baja presión: uno en la zona sur sobre el continente y otro en el océano Pacifico en el eje 45°S acercándose hacia el continente. Estos centros de baja presión generan, por un lado, el transporte de humedad desde latitudes bajas donde la evaporación del océano es mayor y por otro, la inestabilidad necesaria para la formación de frentes de mal tiempo.

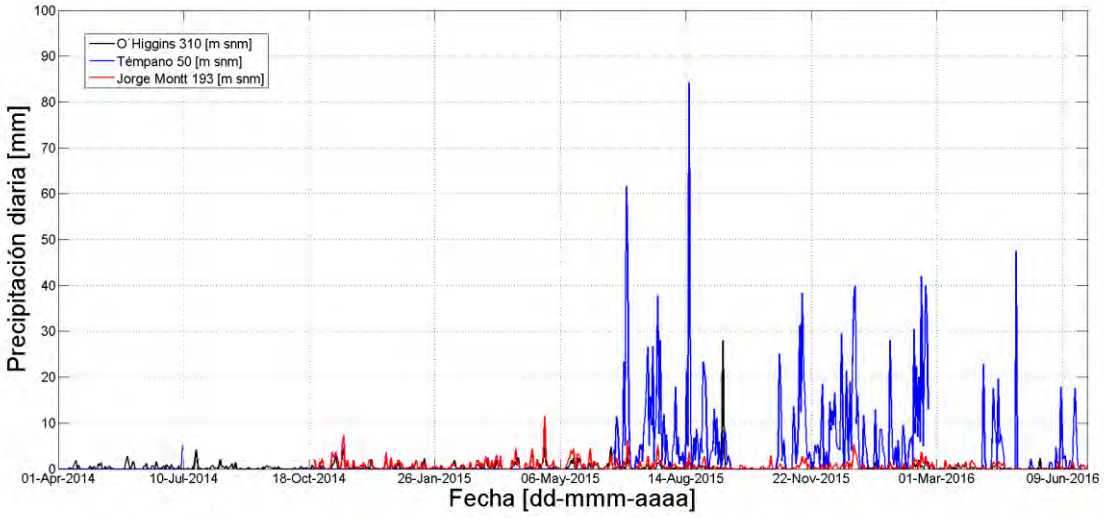


Figura 2.21 Precipitaciones diarias en las tres estaciones periferia CHS.

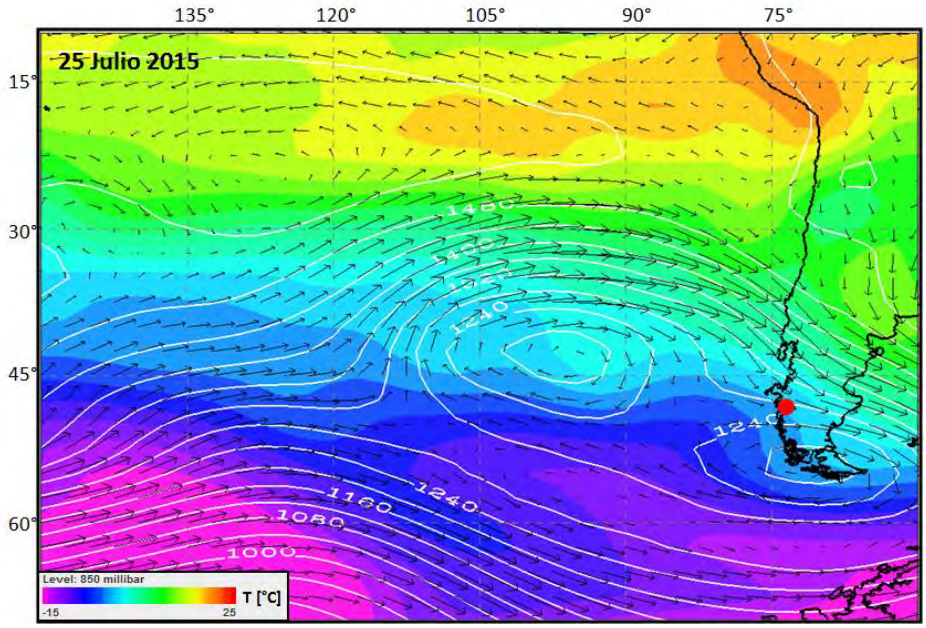


Figura 2.22 Carta sinóptica del 25 de julio de 2015. Nivel de 850 hPa. Isolíneas blancas corresponde a altura geopotencial, flechas corresponden a magnitud y dirección del viento y sombrado de colores a la temperatura en 850 hPa. Punto rojo indica localización de Campo de Hielo Sur. Datos corresponden a re-análisis NCEP-NCAR.

2.6.2 Análisis de estaciones meteorológicas meseta

2.6.2.1 Temperatura del aire

Los datos de temperatura del aire, expresados como promedios diarios de las tres estaciones meteorológicas en la zona norte de la meseta de CHS, se muestran en la Figura 2.23. Las estaciones Hielo Sur en Glaciar Greve Nunatak Occidental (HS Nunatak) y Hielo Sur en Glaciar O´Higgins (HS O'Higgins) presentan series más cortas respecto a Hielo Sur en Glaciar Greve (HS Greve) debido a que esta última fue la primera estación de meseta implementada y por lo tanto de la que se dispone la serie de datos más extensa, mostrando el ciclo anual de las temperaturas con máximas promedio diarias sobre los 10°C en los meses de verano y mínimas promedio diarias incluso bajo los -5°C. En la Figura 2.24 se muestra en detalle el periodo correspondiente a las tres estaciones en régimen. La variabilidad interdiaria de las tres estaciones es prácticamente igual, siendo la correlación entre las estaciones son del orden 0.93 a 0.98. El promedio de la temperatura para los días en común durante el periodo de ablación es mayor en HS Nunatak (3.8 °C) mientras que en HS Greve el promedio llega a 1.4°C y siendo para HS O'Higgins de 2.9 °C en promedio. En este sentido las temperaturas responden directamente a las diferencias altitudinales entre las estaciones (Tabla 2.2).

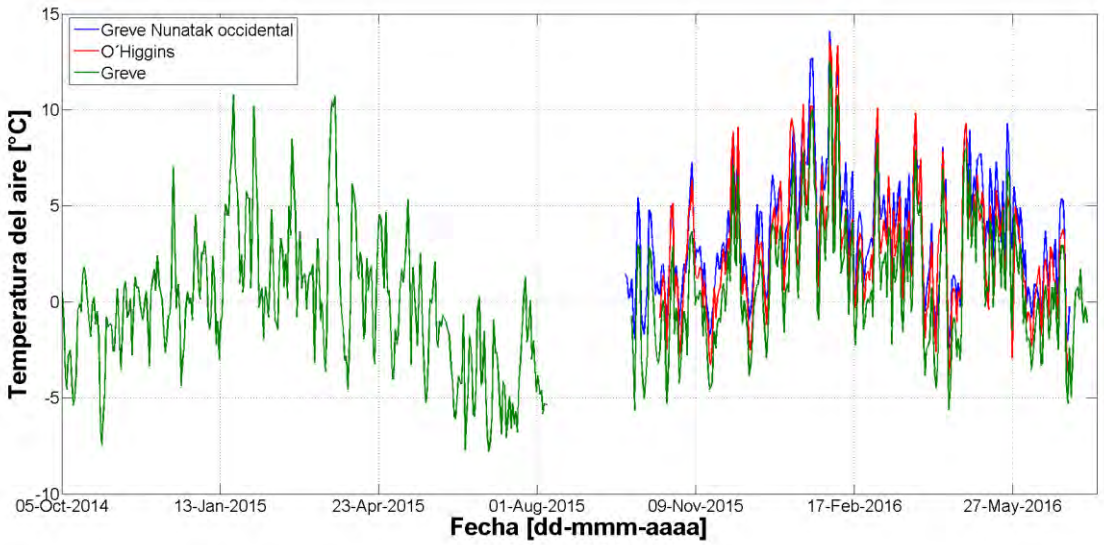


Figura 2.23 Promedio diario de la temperatura del aire de estaciones instaladas en meseta de CHS.

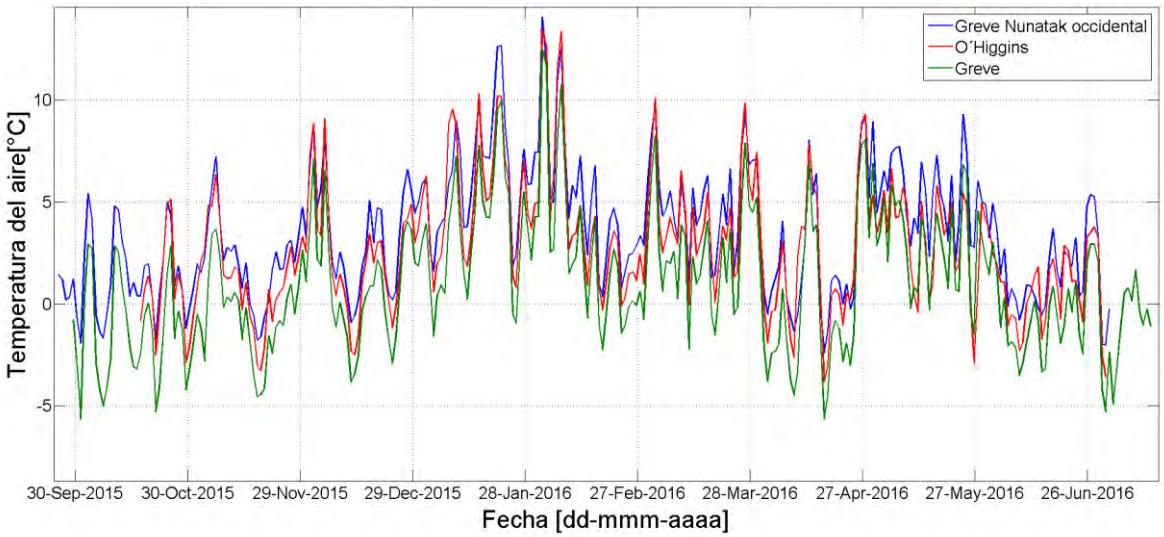


Figura 2.24 Detalle del periodo de en común de mediciones de temperatura del aire en estaciones de meseta.

2.6.2.2 Humedad relativa

A partir del análisis de los valores de humedad relativa del aire registrados por cada una de las estaciones implementadas en la meseta de CHS (Figura 2.25) se observa quepresentan prácticamente la misma variabilidad con coeficientes de correlación entre 0.90 y 0.96. Del análisis correspondiente al periodo en que las tres estaciones estaban implementadas, la humedad relativa del aire es más alta en HS Nunatak (84%) y HS Greve (83%) que las condiciones más secas de HS O'Higgins (79%). Estos valores confirman que el sector occidental de CHS es más húmedo en relación al sector oriental.

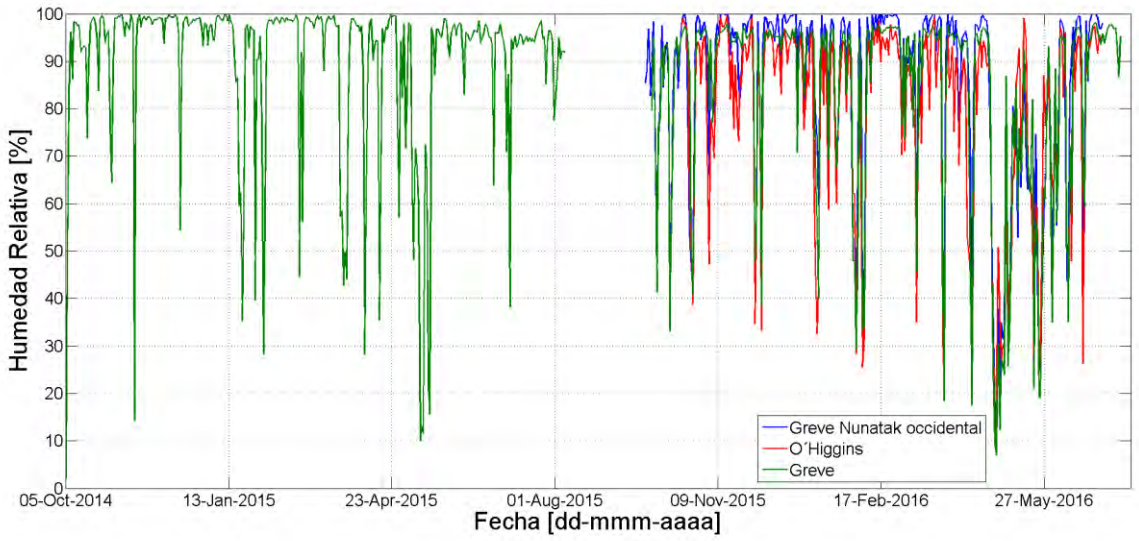


Figura 2.25 Humedad relativa del aire promedio registrada en las tres estaciones de meseta en CHS.

2.6.2.3 Presión atmosférica

Los valores de presión atmosférica registrados en las tres estaciones, aunque distintos debido a las diferencias de altitud entre ellas, presentan la misma variabilidad interdiaria. Por ejemplo para HS Greve, los valores se muestran acordes a la altitud del lugar (1,428 m snm), que corresponde a una atmosfera estándar aproximadamente de 850 hPa. En la serie de datos (Figura 2.26) se aprecia la variabilidad asociada a las condiciones sinópticas, registrándose incluso valores bajo los 830 hPa (HS Greve) asociados al paso de sistemas frontales y valores sobre los 900 hPa, los cuales se encuentran asociados a condiciones dominadas por el Anticiclón del Pacífico, desplazada hacia latitudes mayores (dorsal) como se aprecia en la carta sinóptica en la Figura 2.27. Es posible determinar además cierto ciclo anual en los datos de presión de HS Greve, con menores valores en el invierno y mayores en verano. Además es posible apreciar un ciclo sinóptico, donde en general, la presión atmosférica sube durante 4 a 6 días, donde llega a su máximo para luego descender por la misma cantidad de días.

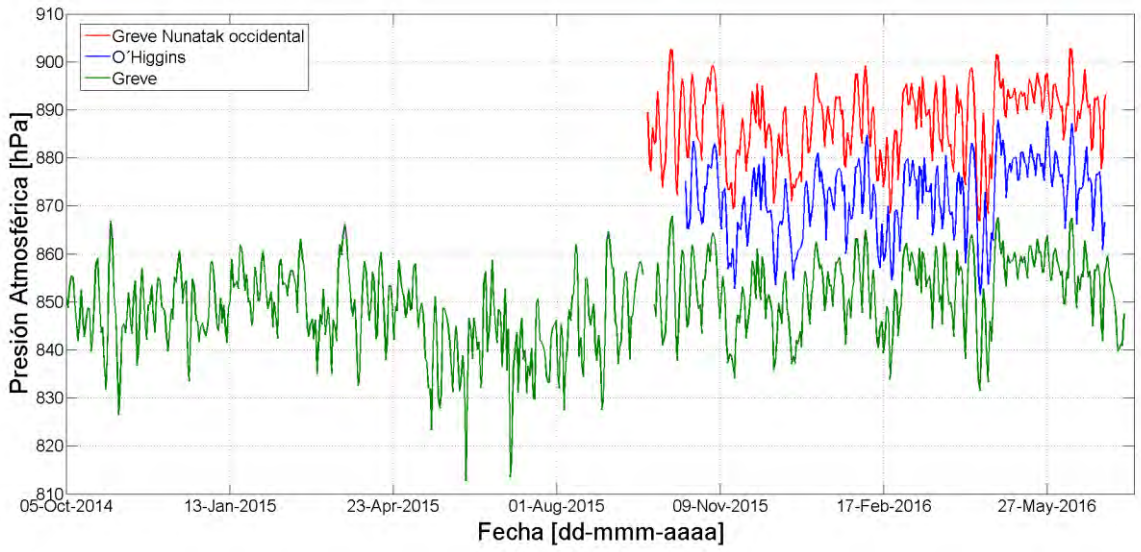


Figura 2.26 Presión atmosférica de las tres estaciones en meseta en CHS. Datos promedio diarios.

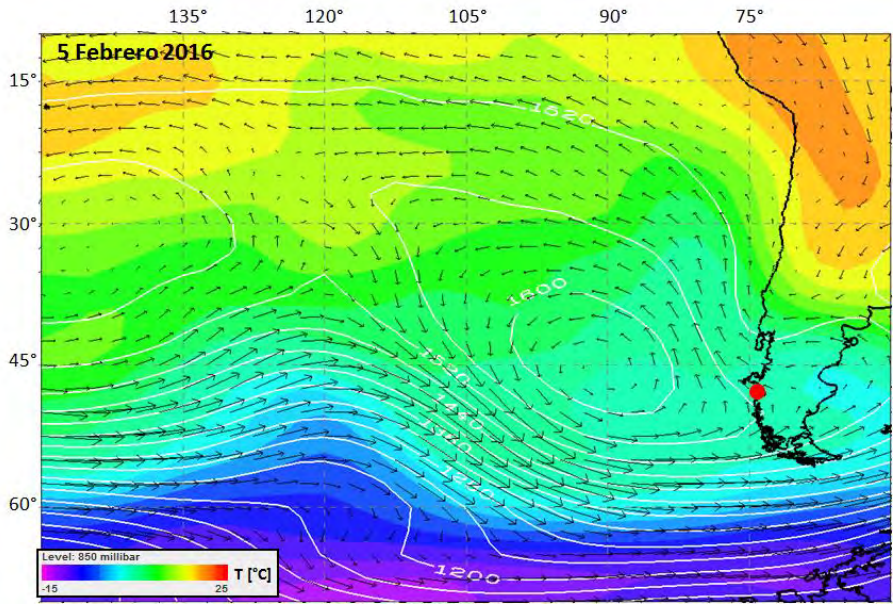


Figura 2.27 Mapa sinóptico del 5 de febrero de 2016. Isolíneas blancas corresponde a altura geopotencial, flechas corresponden a magnitud y dirección del viento y sombrado de colores a la temperatura en 850 hPa. Punto rojo indica localización de CHS. Datos corresponden a re-análisis NCEP-NCAR.

2.6.2.4 Velocidad y dirección del viento

La velocidad del viento (Figura 2.28) muestra registros más altos para la estación HS O´Higgins, con promedios diarios que llegan en algunos casos a superar los 25 m/s. En general la magnitud del viento se encuentra relacionada con la presión atmosférica, donde altas presiones se asocian a vientos más calmos y bajas presiones a una mayor magnitud del viento (Figura 2.29). La variabilidad es similar entre las estaciones, especialmente entre HS Nunatak y HS Greve donde el coeficiente de correlación alcanza a 0.76.

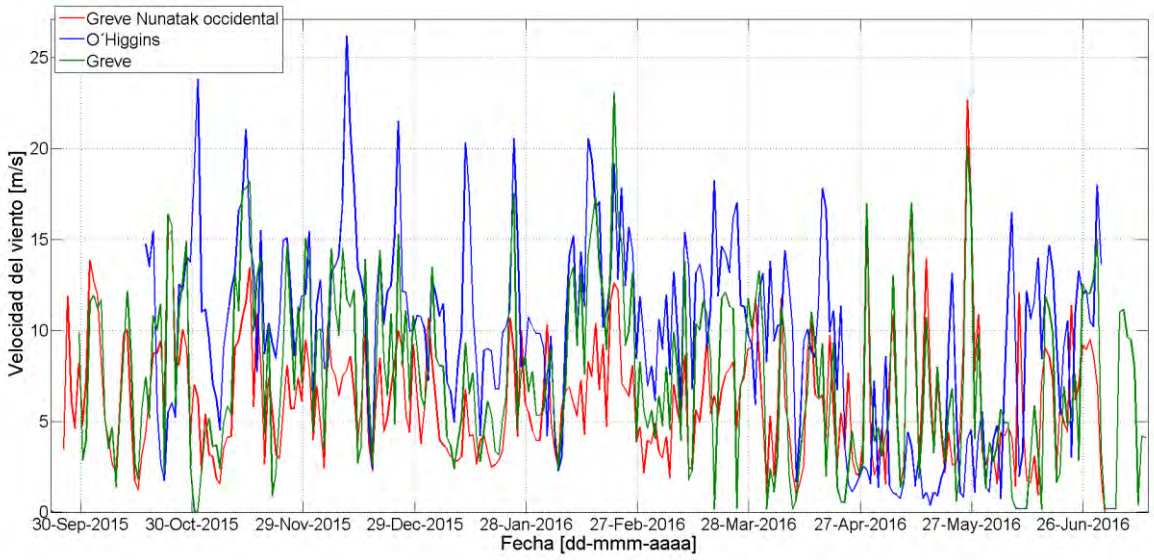


Figura 2.28 Velocidad promedio diario del viento en las tres estaciones en meseta de CHS.

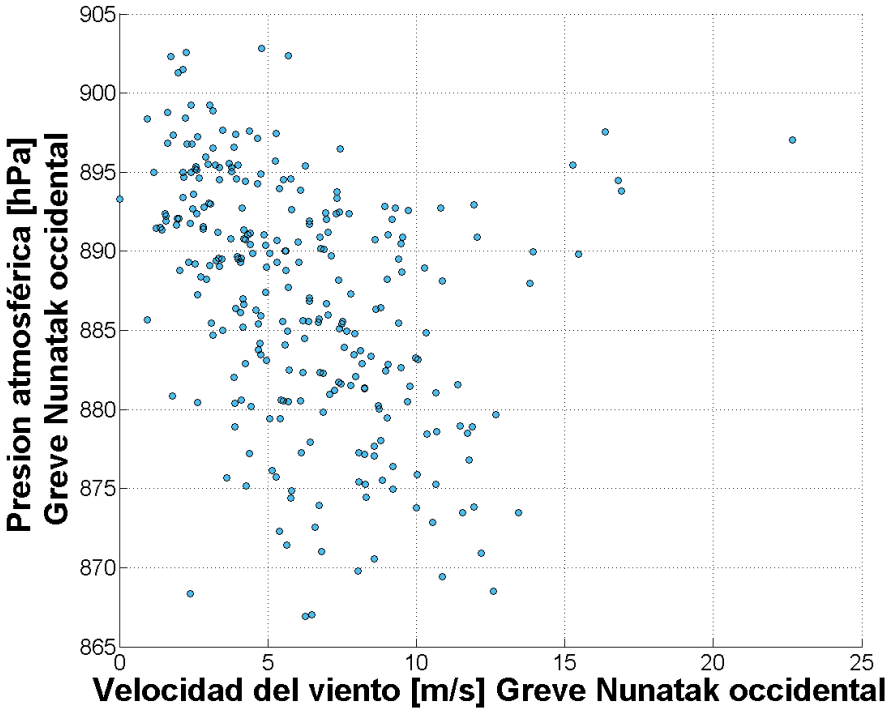


Figura 2.29 Relación entre velocidad del viento y presión atmosférica en estación HS Glaciar Greve Nunatak Occidental.

La dirección del viento es preferentemente desde el oeste en las tres estaciones (Figura 2.30). En HS Greve y HS Greve Nunatak occidental desde el nor-oeste y en HS O'Higgins desde el sur-oeste. La estación HS Greve Nunatak occidental muestra una mayor dispersión en la dirección del viento. Existe una relación en la cual los vientos del oeste tienden a ocurrir en días de más baja presión y viceversa (Figura 2.31).

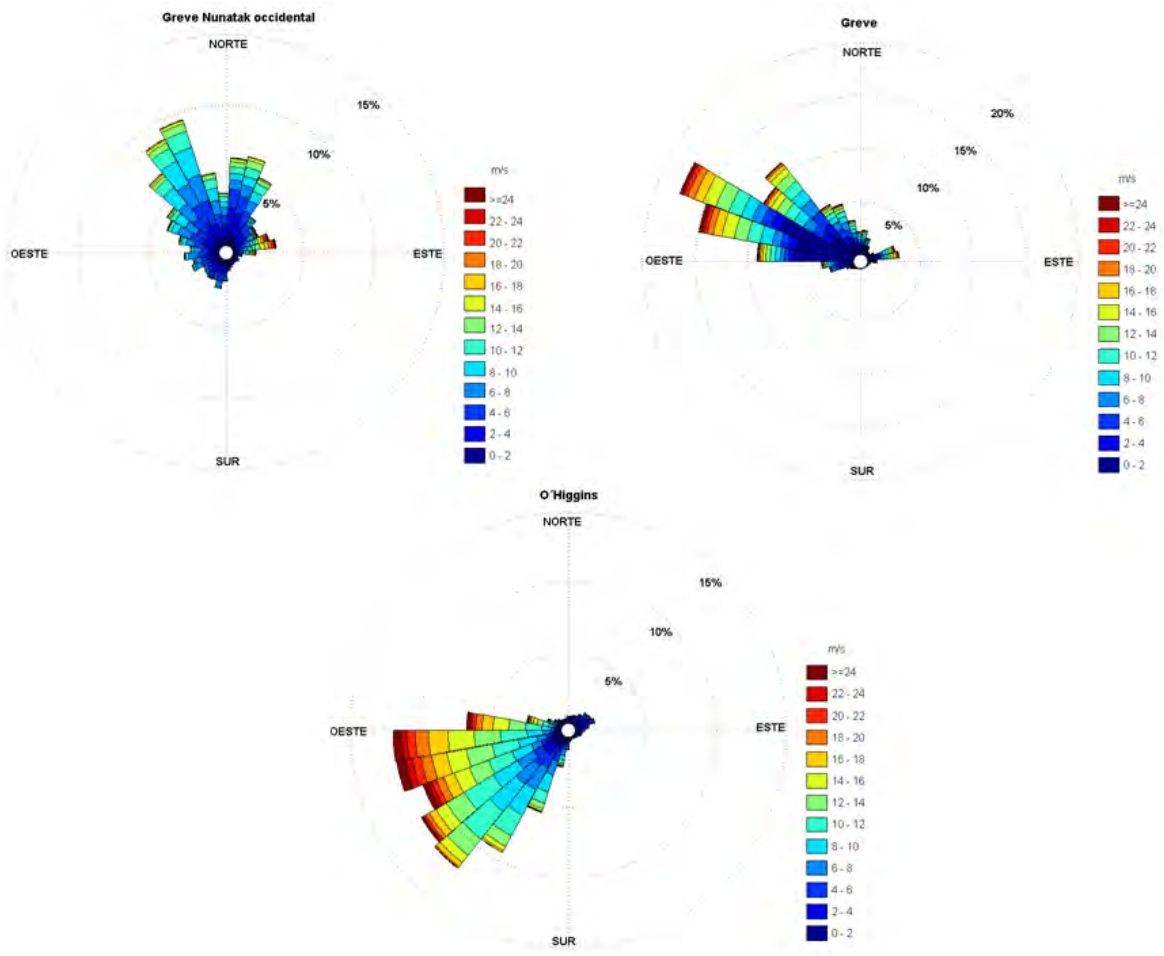


Figura 2.30 Rosa de vientos indicando dirección y magnitud del viento en estaciones en meseta de CHS. Datos instantáneos para el periodo octubre 2015 a julio 2016 (HS Greve Nunatak occidental y O'Higgins) y octubre 2014 a junio 2016 (HS Greve).

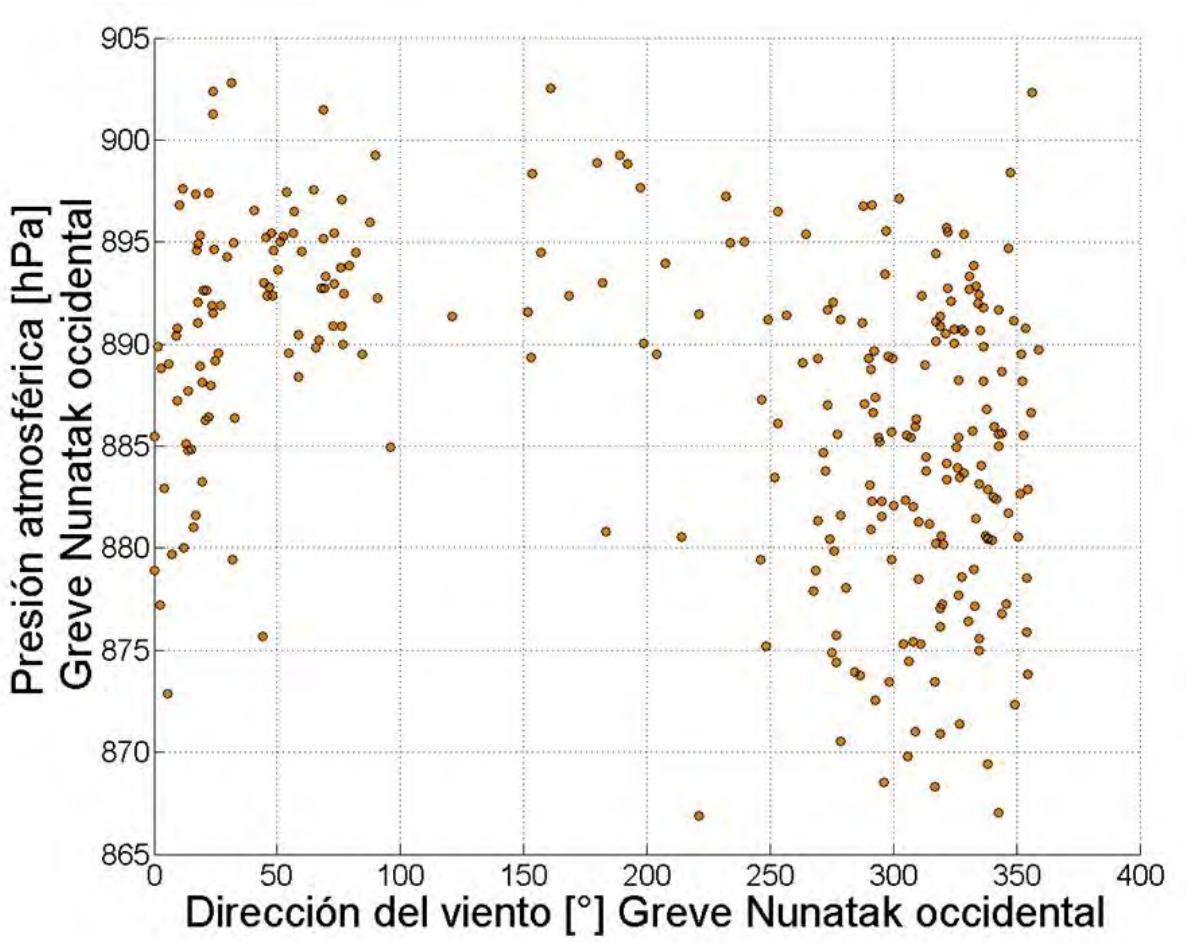


Figura 2.31 Relación entre dirección del viento y presión atmosférica en estación HS Glaciar Greve Nunatak Occidental.

2.6.2.5 Radiación solar incidente de onda corta y radiación incidente de onda larga

La radiación solar incidente de onda corta muestra parte del ciclo anual en las tres estaciones (Figura 2.32). Comparando los datos de HS Nunatak occidental con HS O´Higgins se aprecia que la primera tiene valores menores de radiación solar respecto a la segunda. La variabilidad interdiaria es similar entre ambas estaciones con un coeficiente de correlación de 0.72. Al igual que en el caso de las estaciones de periferia,

la diferencia responde a la mayor cantidad de nubosidad en el sector occidental respecto al sector oriental.

En cuanto a la radiación incidente de onda larga (Figura 2.33), la estación HS Greve, aparentemente debido a las condiciones extremas en que se emplaza (escarcha o congelamiento de sensor), presentó interrupciones y valores erróneos, por lo que no fue incluida en el análisis. Las estaciones HS Nunatak occidental y HS O´Higgins muestran la misma variabilidad con un coeficiente de correlación de 0.89 con valores superiores en la primera respecto a la segunda estación.

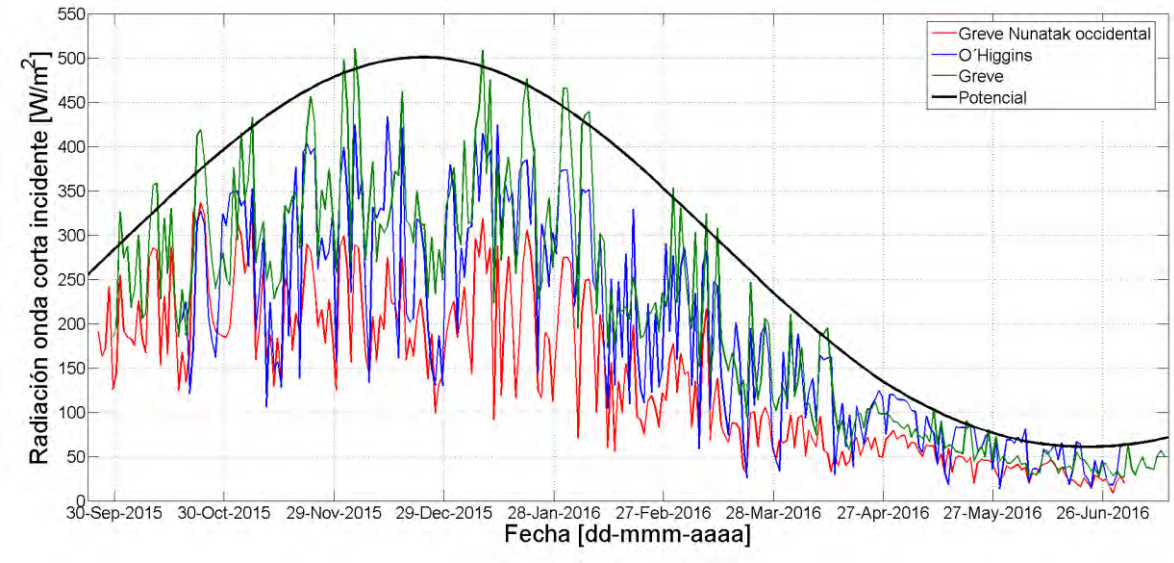


Figura 2.32 Radiación de onda corta en las tres estaciones de meseta de CHS. Línea negra indica radiación solar potencial (onda corta), valores promedios diarios.

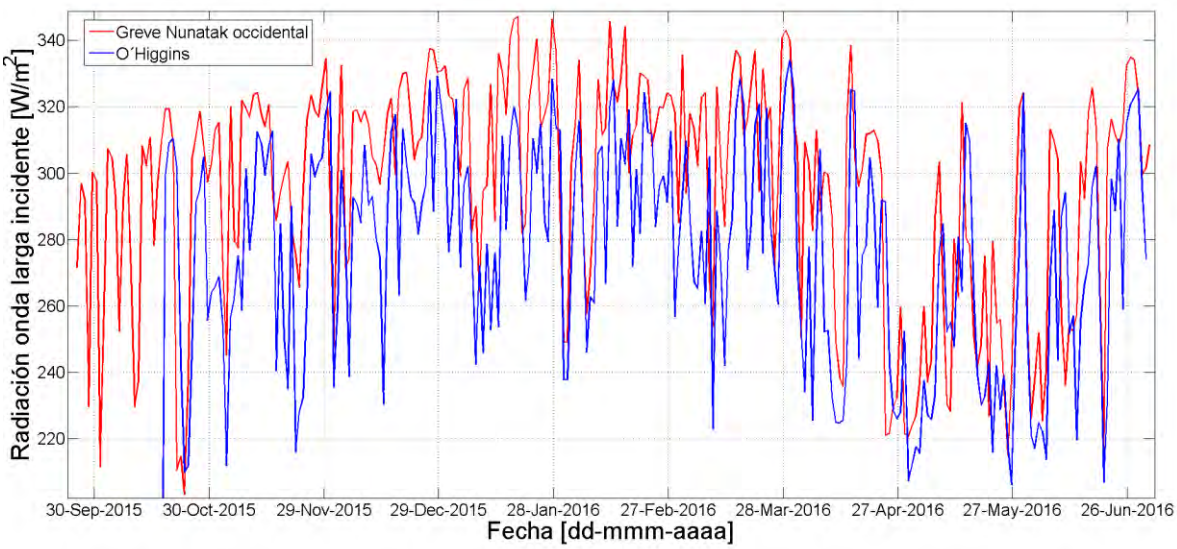


Figura 2.33 Radiación de onda larga estaciones Greve Nunatak occidental y O´Higgins. Valores promedios diarios.

2.6.3 Análisis comparativo entre la fachada oriental y occidental de CHS

Los antecedentes señalados en las secciones previas y la descripción de las variables meteorológicas observadas en la zona norte de Campo de Hielo Sur, tanto en periferia como en meseta, confirman que existen diferencias meteorológicas entre la fachada oriental y occidental. La configuración espacial de la estaciones implementadas (con excepción de Estación Jorge Montt, Figura 2.1) permite comparar y diferenciar las variables meteorológicas, en una transecta de aproximadamente 180 km de longitud.

El análisis de datos de temperatura del aire a lo largo del perfil topográfico se refiere al periodo de ablación del año hidrológico 2015-2016 (Figura 2.34), ya que es el periodo en el cual todas las estaciones se encuentran implementadas. Como referencia se han agregado datos de la climatología CRU. Al mismo tiempo, se presentan los promedios de temperatura para cada estación meteorológica (Figura 2.34). Todos los valores son positivos y como era de esperar la estación HS Greve es la que muestra promedios más bajos. Destaca también la diferencia de casi 7°C promedio entre la estación HS O´Higgins (meseta) y O´Higgins (periferia) ubicadas a una distancia de 10 km con una diferencia de 924 m. Es interesante indicar que a pesar de encontrarse a mayor altitud, la estación O´Higgins (310 m snm) tiene una mayor temperatura promedio respecto a Témpano (50 m snm) en el lado occidental. Este hecho confirma las apreciaciones previas que sugieren que la fachada oriental sería más cálida respecto a la occidental debido al efecto mecánico del propio CHS sobre los vientos del Oeste, permitiendo que en esta transecta la parcela de aire al entrar en contacto con CHS ascienda, enfriándose en el sector occidental, y descienda para calentarse en el sector oriental. Además se aprecia que los

datos CRU no son necesariamente representativos de esta zona ya que existen diferencias entre las temperaturas observadas y el rango de temperaturas modeladas.

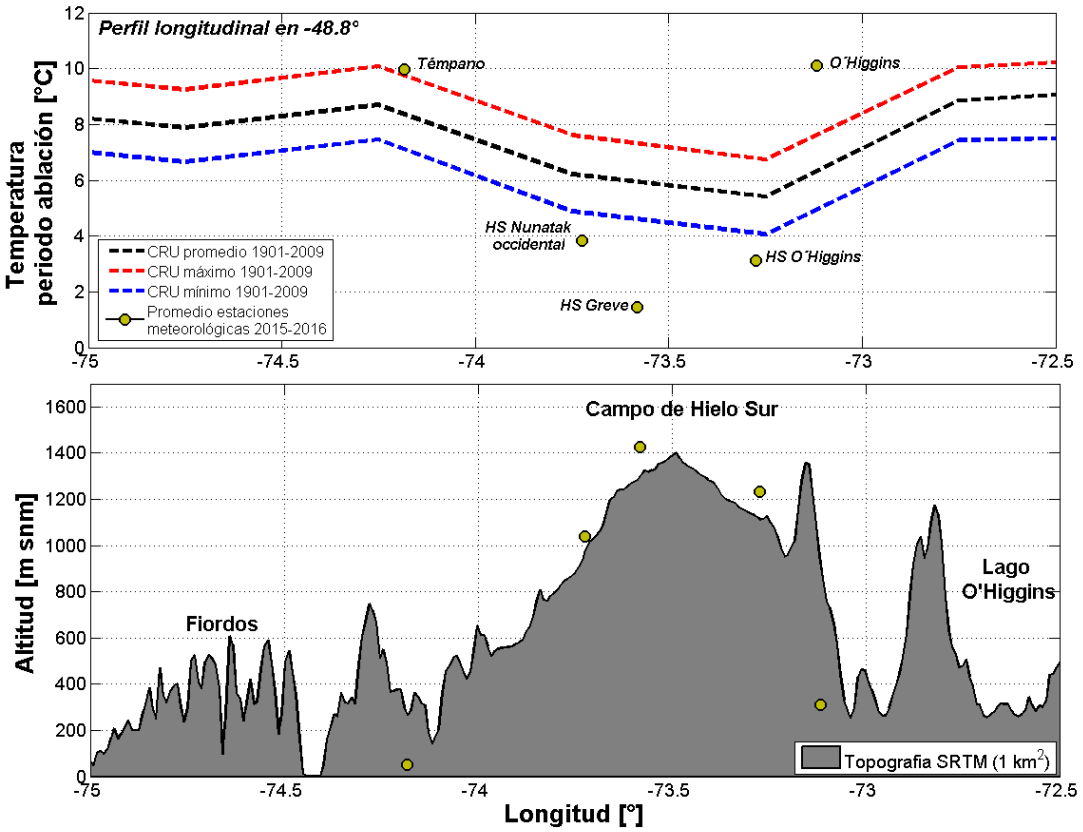


Figura 2.34 Perfil topográfico longitudinal a latitud 48.8ºS, en la zona norte de CHS. Se muestra la temperatura del aire promedio de las estaciones en el periodo octubre 2015 a marzo 2016 (panel superior). Como referencia se muestran los datos de climatología CRU 3.1. Perfil topográfico de la zona con la localización de las estaciones (panel inferior).

A lo largo del mismo perfil longitudinal, la fachada oriental muestra condiciones de mayor sequedad del aire (menor humedad relativa) en relación a la fachada occidental (Figura 2.35).

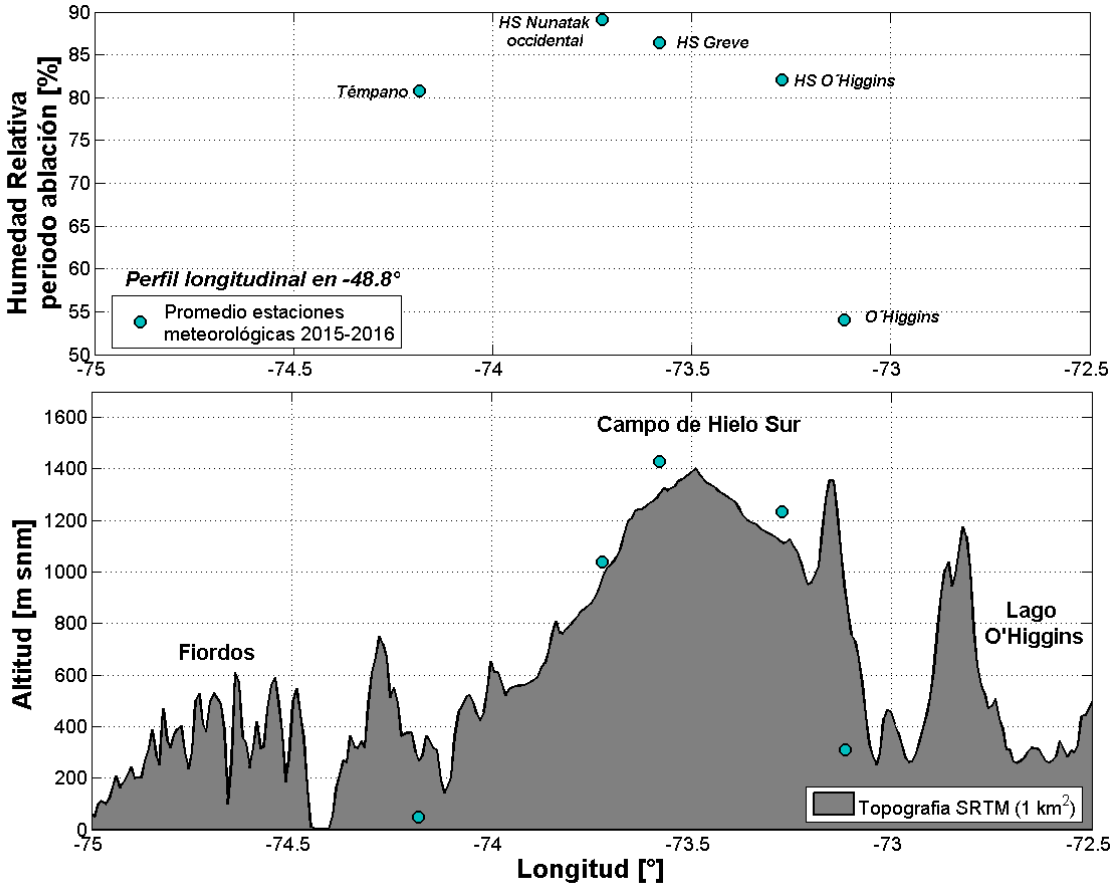


Figura 2.35 Perfil topográfico longitudinal a latitud 48.8ºS, en la zona norte de CHS. Se muestra la humedad relativa promedio de las estaciones en el periodo octubre 2015 a marzo 2016 (panel superior). Perfil topográfico de la zona con la localización de las estaciones (panel inferior).

La estación O´Higgins es la que registra menor humedad relativa. Al igual que en el caso de la temperatura del aire, la parcela de aire al ascender por forzamiento mecánico puede condensar y saturarse, debiendo descargar su humedad en forma de precipitación. Una vez que descarga y sobrepasa la divisoria, la parcela de aire desciende seca, aumentando su temperatura. Se debe considerar que conceptualmente la humedad relativa presenta un decaimiento exponencial con la altitud en una atmósfera estándar. Destaca entonces que el promedio de la humedad relativa de HS Nunatak occidental es el más alto (~90%), incluso por

sobre el registro promedio de humedad relativa en la estación Témpano, situada a menor altitud.

La humedad relativa condensa la parcela de aire formando nubes. Por ende, la humedad relativa es un indicador de la presencia de nubosidad. No obstante, debido que se dispone de los datos de radiación solar incidente, se establecerán las condiciones de nubosidad utilizando dichos registros.

Los datos de radiación solar incidente a nivel horario para el periodo en las tres estaciones de periferia se muestran en la Figura 2.36. En ellos se aprecia el ciclo diario y anual y la menor radiación incidente en Témpano respecto de las demás estaciones. A pesar de estas diferencias, los coeficientes de correlación entre los valores registrados en las distintas estaciones son altos: entre O'Higgins y Jorge Montt es de 0.84; Témpano y Jorge Montt es 0.91 y entre Témpano y O'Higgins es 0.84. Esto sugiere una modulación a escala regional de la nubosidad, siendo la diferencia de magnitud debida a las condiciones de localización de las estaciones.

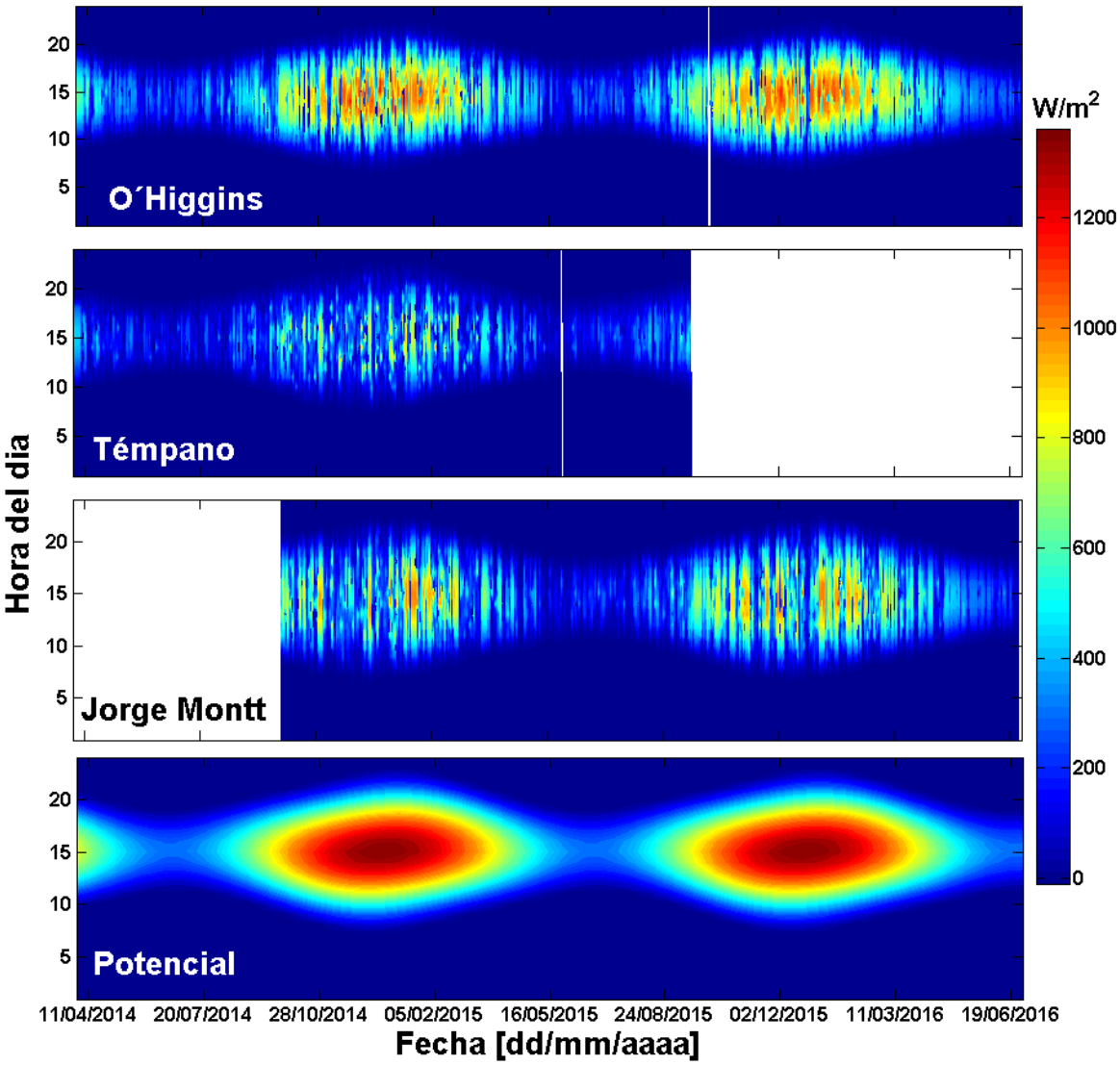


Figura 2.36 Diagrama de la radiación solar incidente en las tres estaciones de periferia. Como referencia se muestra la radiación potencial calculada como la radiación que llega al tope de la atmosfera.

2.6.4 Estimación del derretimiento en CHS

Para determinar el derretimiento de nieve y hielo en CHS, se utilizó un modelo de grados-días (DDM, por sus siglas en inglés; *Degree Day Model*), que consiste básicamente en cuantificar la dependencia lineal de la sumatoria de las temperaturas positivas a nivel diario. Es una relación simple y empírica que relaciona la tasa de ablación con la temperatura diaria sobre 0°C [*Hock*, 2003]:

$$\sum_{i=1}^{n} M = DDF \sum_{i=1}^{n} T^{+} \Delta t \qquad \textbf{(2.2)}$$

DDF corresponde al *Degree Day Factor*. Este concepto corresponde al monto de derretimiento por día que ocurre cuando se observan temperaturas sobre los 0°C. Sus unidades son por lo tanto [mm d^{-1} $°C^{-1}$].

El derretimiento **a** es proporcional a la temperatura media T_{mean} y ocurre para valores de T_{mean} mayores al umbral de temperatura (T_0), el cual, en este caso, se asumió en 0°C. Aquí se utilizó el concepto de *Positive Degree Day* (PDD) [*Hock*, 2003], que se define como:

$$PDD(t,z) = \begin{cases} (T_{mean}(z) - T_0), & T_{mean} > 0°C \\ 0 \quad , & T_{mean} \leq 0°C \end{cases} \qquad \textbf{(2.3)}$$

PDD corresponde a la suma de las temperaturas diarias que se encuentran sobre 0°C que, en este caso, se asocia a la T_{mean} diaria. Finalmente el valor

de PDD se multiplica por DDF, obteniéndose el derretimiento diario a. Por lo tanto, esta aproximación toma la siguiente forma:

$$a(t,z) = DDF_{ice/snow} * PDD \quad \textbf{(2.4)}$$

Para la aplicación de este modelo, de manera distribuida, se utilizó un Modelo Digital de Elevación (DEM, por sus siglas en inglés) con una resolución de 90 m (SRTM, *Shuttle Radar Topography Mission*), y un gradiente de temperaturas promedio (°C/m), a partir de los datos observados en periodos comunes entre los registros de las estaciones Jorge Montt en el fiordo y Hielo Sur en Glaciar Greve; Glaciar O'Higgins y Hielo Sur en Glaciar O´Higgins; y Glaciar Témpano y Hielo Sur Greve Nunatak Occidental.

Con la red de estaciones meteorológicas implementadas tanto en periferia como en meseta de CHS (Figura 2.1) se estimaron los gradientes de temperatura para distintas zonas. La Tabla 2.4 muestra los gradientes calculados para tres sectores utilizando los datos observados de las estaciones meteorológicas. La Figura 2.37 muestra la zonificación que se estima representa los pares de estaciones. Esta zonificación fue construida sobre la base de los contornos generados por el DEM empleado. Para cada sector se atribuyó el gradiente de temperaturas representativo, obteniendo la distribución espacial y temporal de la temperatura del aire. Los datos utilizados para realizar esta extrapolación corresponden a los promedios diarios de los registros en las estaciones de periferia. El resultado de la extrapolación usando el gradiente observado para la localización de la estación de meseta HS Greve es comparado con las observaciones de la misma (Figura 2.38). La variabilidad es prácticamente

idéntica con un coeficiente de correlación de 0.81. Existen algunas diferencias en los *peaks* y hacia el final del periodo.

Tabla 2.4 Gradientes de temperatura del aire por sector en CHS.

Estaciones meteorológicas	Gradiente observado de T [°C/m]	Diferencia Altitud (m)	Sector representativo
Témpano / HS Greve Nunatak Occ.	-0.0071	990	Oeste
Jorge Montt / HS Greve	-0.0064	1234	Norte
O´Higgins / HS O´Higgins	-0.0076	924	Este

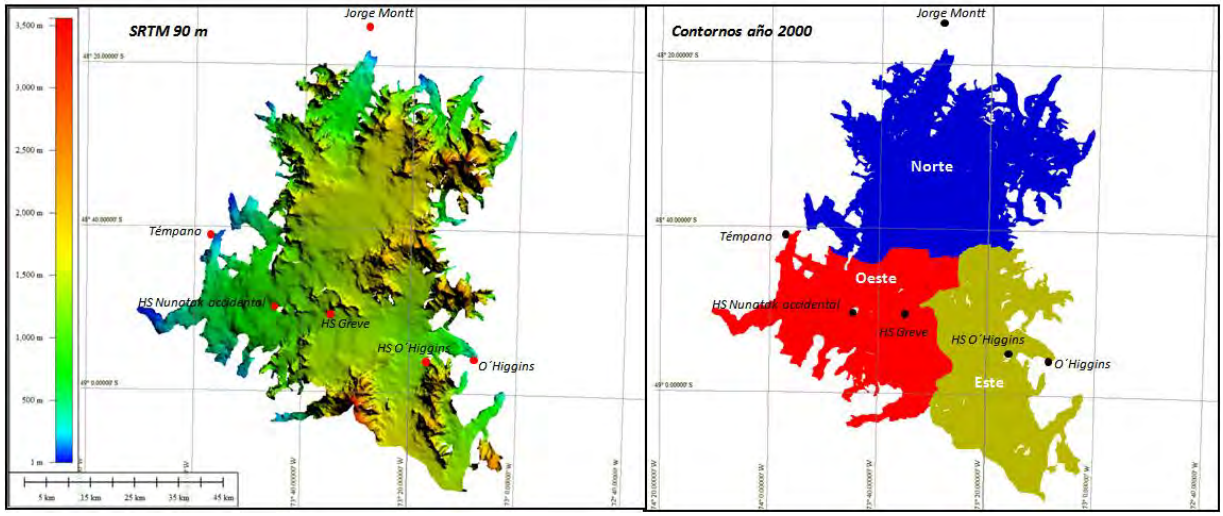


Figura 2.37 SRTM DEM utilizado para la distribución espacial de la temperatura del aire (derecha) y zonas representativas estimadas de gradientes de temperatura observados (izquierda).

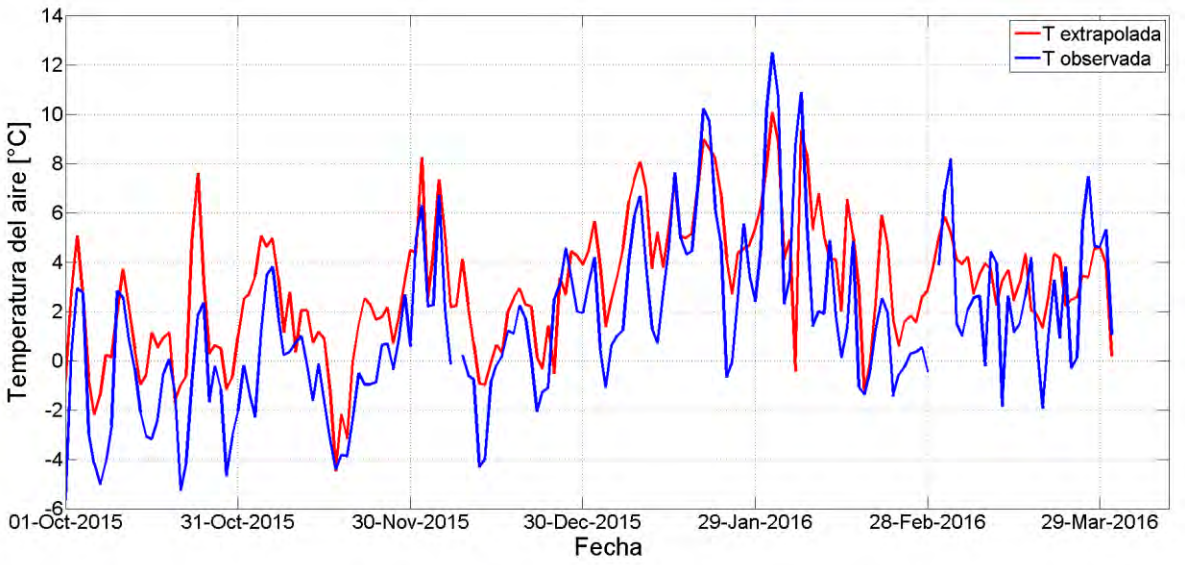


Figura 2.38 Temperatura del aire (extrapolada y observada) para el punto de localización de la estación Hielo Sur en el Glaciar Greve.

Con los datos diarios de temperaturas del aire distribuidas espacialmente en el periodo 1 de octubre de 2015 a 31 de marzo de 2016, se procedió a calcular el derretimiento por cada punto de grilla SRTM (Figura 2.37). Se utilizó un DDF de hielo de 0.0065 m w.e. d^{-1} $°C^{-1}$ y un DDF de nieve de 0.0035m w.e. d^{-1} $°C^{-1}$, ecuación (2.2). El valor de DDF de nieve es menor al de hielo debido a que el albedo es mayor. Estos valores corresponden a datos comunes para la estimación de derretimiento [*Hock*, 2003] y son los utilizados por De Angelis [2014] para el cálculo del balance de masa en Patagonia. Para diferenciar entre superficie de hielo y superficie de nieve se utilizaron las estimaciones de línea de equilibrio glaciar del mismo autor [*De Angelis*, 2014] para los principales glaciares por sector definido (Figura 2.37). Así, para el sector norte se asumió una altitud de línea de equilibrio de 930 m snm (glaciar Jorge Montt), para el sector Oeste de 860 m snm (glaciares Greve y Témpano) y para el sector oriental una altitud de línea de equilibrio de 1200 m snm (glaciar O´Higgins).

El resultado de la estimación del derretimiento se muestra espacialmente en la Figura 2.39. Como era de esperarse, los máximos derretimientos se verifican en las zonas bajas de cada glaciar con máximos acumulados que sobrepasan los 12 m e.a. en el periodo de ablación analizado (octubre 2015 a marzo 2016). Este valor se asemeja al estimado por Schaefer *et al.* [2015] que obtuvieron máximos de ablación por sobre los 11 m e.a. en el periodo 1975-2011. Los mínimos de ablación ocurren en las partes altas donde incluso existen zonas, donde prácticamente no se registra derretimiento. El derretimiento se acentúa en el glaciar O'Higgins (fachada oriental) y en los glaciares Témpano, Occidental y Greve en la fachada occidental. El glaciar Jorge Montt presenta menor derretimiento con respecto al Glaciar Lucía y otros aledaños, confirmando que en el Glaciar Jorge Montt predomina el retroceso dinámico sobre el derretimiento.

La serie de tiempo diaria del derretimiento (Figura 2.40) permite apreciar la variabilidad interdiaria, principalmente en los meses de octubre y noviembre, en los que incluso se registran días con escaso derretimiento. Los mayores valores de derretimiento corresponden a los meses de enero y febrero de 2016, destacando un evento *peak* de derretimiento ocurrido el día 2 de diciembre de 2015. En enero ocurre el mayor derretimiento, seguido de febrero y marzo con valores similares, mientras que en octubre se produce el menor derretimiento (Figura 2.41). El comportamiento a nivel mensual ocurre de manera acorde al ciclo anual de las temperaturas.

La Figura 2.41 muestra también la estimación del derretimiento usando un DDF mayor para la nieve, el cual fue determinado usando los datos de las torres nivométricas instaladas en la meseta. Como es de esperar se aprecia mayor derretimiento con aumentos entre el 4% en octubre hasta de 13% en enero.

Si bien hay pocas observaciones de acumulación en CHS [*Schwikowski et al.*, 2013], se ha estimado que la precipitación sólida a nivel anual alcanza a unos 7 m e.a. de acuerdo a datos de caudales [*Escobar et al.*, 1992], y de 8.36 m utilizando modelos climáticos [*Schaefer et al.*, 2015]. La persistencia de estas altas tasas explicaría que, en su conjunto, CHS tendría un balance de masa con una tendencia levemente positiva (0.054 ± 0.012 m e.a.y^{-1}) en el periodo 1975-2011 [*Schaefer et al.*, 2015]. Esta estimación posee alta incertidumbre requiriendo un mayor registro de datos de terreno para su confirmación.

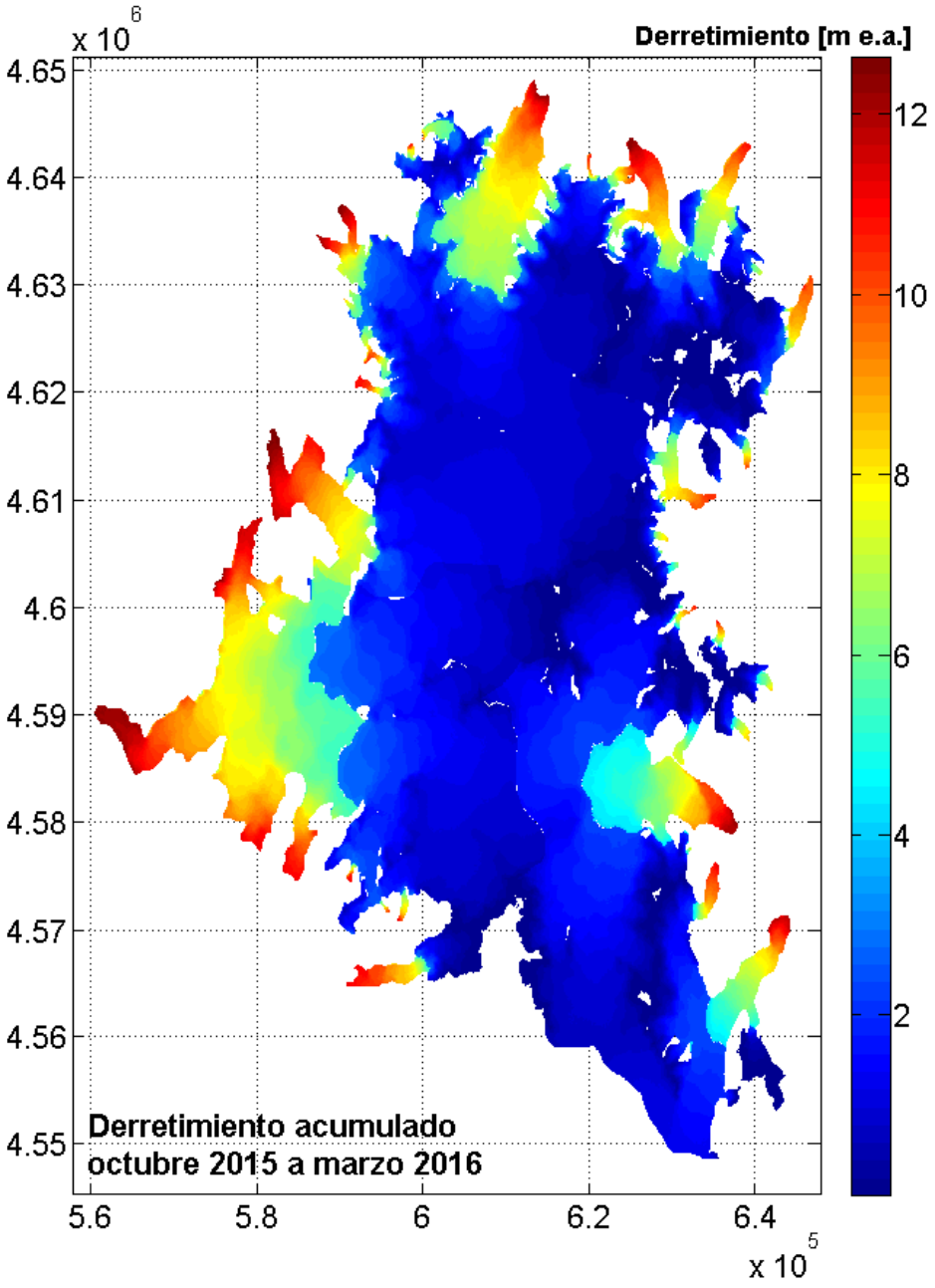


Figura 2.39 Distribución espacial del derretimiento acumulado en el periodo octubre 2015 a marzo 2016 en CHS.

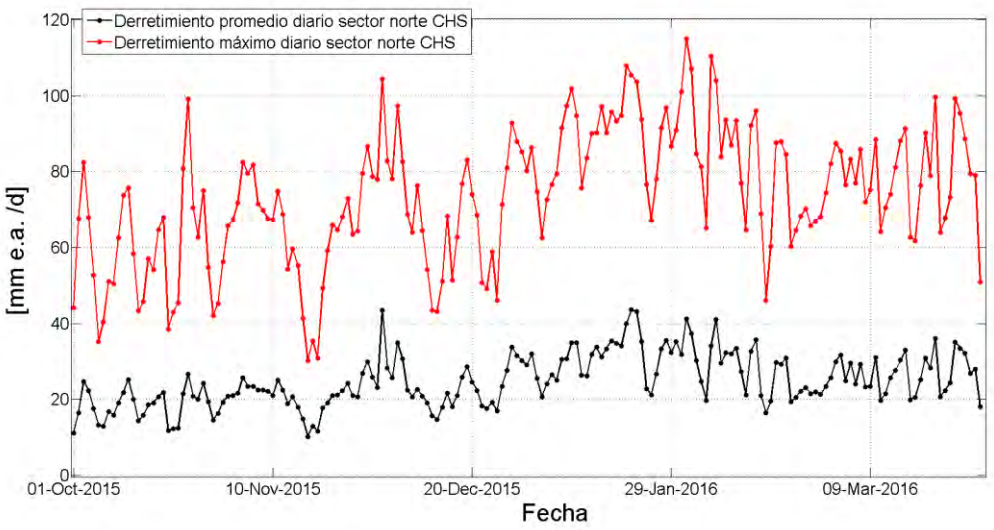


Figura 2.40 Derretimiento diario total de la zona norte de CHS.

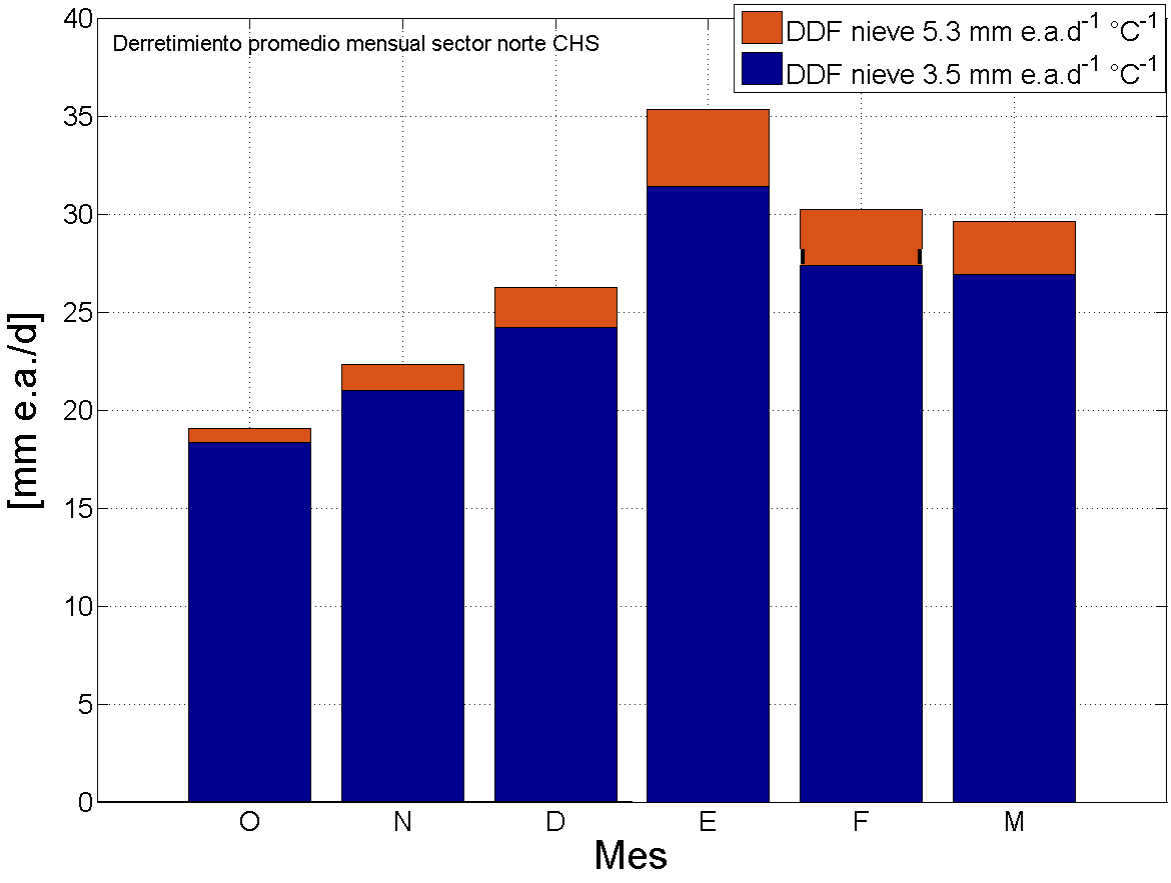


Figura 2.41 Derretimiento mensual de toda el área norte de CHS, periodo octubre 2015 a marzo 2016.

Esta estimación del derretimiento de la zona norte de CHS constituye una primera aproximación no exenta de incertidumbres. Primero, se debe indicar que el uso de datos SRTM de una antigüedad de 16 años pudiera no representar necesariamente la realidad actual de los glaciares de CHS, especialmente en sus zonas bajas, donde al retroceso detectado se debe sumar el adelgazamiento glaciar. En segundo término, existe incerteza asociada al hecho de asumir la altitud de línea de equilibrio glaciar como el límite para diferenciar entre superficie de hielo y nieve, que se correlaciona con la línea de nieve preferentemente al final del año hidrológico (marzo-abril), no considerando que durante todo el periodo de ablación pudiera presentarse variabilidad, debido a precipitaciones sólidas. Una forma adecuada de separar entre superficie de hielo y nieve es utilizar el producto MODIS/*Terra Snow Cover Daily* L3 Global 500 m grid (MOD10A1) del cual se puede derivar la altitud de la línea de nieve a nivel diario. Otra forma es estimar la altitud de isoterma 0°C a nivel diario como referencia de la altitud de la línea de nieve.

Respecto al DDF de hielo y nieve, se han utilizado valores teóricos, los que debieron ser ajustados la realidad de CHS. Los datos de torres nivométricas pueden ayudar a calibrar un DDF de hielo y nieve local más preciso. A pesar de lo anterior, se estima que el acercamiento de un modelo grados-días puede ser una buena herramienta de entrada para la estimación del balance de masa, debido a su simpleza y acotado requerimiento de datos. Se debe trabajar en la determinación de la acumulación con el objetivo de cerrar el balance de masa con datos meteorológicos, lo que excede los límites del presente proyecto.

2.7 Discusión y conclusiones

A partir de la información obtenida durante la ejecución del proyecto, se realizó el análisis climatológico y meteorológico de la zona norte de CHS, contemplando diversas escalas espaciales y temporales, y con distintas fuentes de datos, observaciones, modelos y re-análisis.

Las condiciones climáticas en esta zona están condicionadas por la circulación dominada por los vientos del Oeste, el paso de sistemas frontales de latitudes medias y la interacción con la topografía montañosa de la zona. Esto determina una fachada occidental más húmeda y fría, a diferencia de la oriental más seca y cálida. La red de estaciones meteorológicas implementadas y mantenidas durante el proyecto, está acotada a un área específica, principalmente la referida al perfil occidental-oriental "Témpano-O´Higgins" de 70 km de longitud, confirmándose las diferencias meteorológicas de escala regional. La variabilidad interdiaria de los datos meteorológicos analizados, en general, se encuentra modulada por condiciones sinópticas de gran escala, demostrada en los altos valores de coeficientes de correlación que se estimaron entre los registros de las distintas estaciones. El que dos glaciares distintos (O'Higgins y Témpano) presenten tasas similares de derretimiento (modelado) aun cuando se encuentran emplazados a diferentes altitudes, confirma el efecto de la variabilidad de los valores de temperatura.

Las mayores diferencias entre la fachada oriental y la fachada occidental se dan en los valores de humedad relativa y radiación solar incidente, las cuales muestran para el sector oriental condiciones de mayor sequedad del aire y con menores montos de nubosidad respecto al sector occidental. Particularmente, en cuanto a los valores de humedad relativa se producen los mayores contrastes espaciales, incluso entre estaciones separadas por una distancia por solo 10 km (HS O'Higgins en meseta con 82% de

humedad relativa y O'Higgins en periferia con 54%). Debido a la mayor radiación solar incidente que alcanza la superficie del glaciar O´Higgins, habría mayor energía disponible para el derretimiento.

En cuanto a las tendencias climáticas, habría indicios de aumento de las temperaturas del aire en la región, lo que explicaría el retroceso glaciar debido a un doble efecto: mayores temperaturas incrementando el derretimiento; y mayores temperaturas modificando la fase de precipitación de sólida a líquida disminuyendo así la acumulación de nieve sobre la superficie de los glaciares. En cuanto a las precipitaciones, no existe un indicio claro de cambio, registrándose señales contradictorias entre estaciones y modelos, por lo que sería necesario contar con mayor cobertura espacial de datos y registros más prolongados para la determinación de variaciones en las precipitaciones.

Contar con las estaciones meteorológicas CHS operativas en el largo plazo, permitiría disponer de la información necesaria para evaluar si la tendencia al calentamiento, estimada con los datos de re-análisis NCEP-NCAR y otros modelamientos, sumada al análisis de los registros obtenidos durante la ejecución del proyecto, pueda ser confirmada.

3 Análisis glaciológico de fachadas oriental y occidental de CHS

3.1 Resumen

Se presentan los resultados del análisis glaciológico que describe la dinámica frontal reciente de los glaciares Jorge Montt, Témpano y O'Higgins basado en una revisión bibliográfica exhaustiva y datos generados en el período 2014-2016 a partir de la interpretación de imágenes satelitales y técnicas de fotogrametría terrestre. Durante ese período se reportaron cambios frontales promedio de -31 m/a en el glaciar O'Higgins, de -143 m/a en el Témpano y de -403 m/a en el caso de Jorge Montt. Las velocidades de hielo máximas se obtuvieron en el glaciar Jorge Montt con un promedio de 18±2 m/d obtenidas don el set de fotografías terrestres capturadas entre el 2014 y 2016. Este mismo tipo de fotos resultaron en velocidades de 9±1 m/d en el glaciar O'Higgins y de 4±1 m/d en el caso del Témpano. Dichos valores son concordantes con resultados de estudios recientes para estos glaciares. Estos cálculos y varios parámetros topográficos y teóricos permitieron estimar el flujo de *calving* promedio anual para el periodo 2014-2016 en -2.7 y -1.5 km^3/a respectivamente en Jorge Montt y O'Higgins, y en 0.19 km^3/a en el caso de Témpano, lo que evidencia una descarga de témpanos menor en un orden de magnitud en el glaciar de menor flujo. En los dos primeros glaciares también se determinó que el flujo de *calving* experimenta un incremento muy significativo a fines de verano lo que es coherente con su mayor dinamismo y retroceso de largo plazo. Se estima que dicho rango de variaciones entre glaciares se explica por la topografía diferenciada y las condiciones hidrográficas contrastantes de las zonas de *calving*.

3.2 Introducción

Según Rivera *et al.* [2016], los Andes de Latinoamérica tienen un área de 31,173 km^2 de hielo distribuidos en 42,368 glaciares, la mayor parte de los cuales está en Patagonia, en particular en el Campo de Hielo Sur (CHS) compartido entre Chile y Argentina, que junto a sus cuencas aledañas, tienen un área total de hielo de 14,151 km^2 distribuidos en 6,310 glaciares. En los Andes australes que incluyen esta región Patagónica, se ha estimado que entre el año 2003 y 2011 se perdieron 29 (±10) Gt de hielo por año, una cifra sólo superada por Alaska y otras regiones del Artico [*Gardner et al.*, 2013]. Estas pérdidas volumétricas de hielo se vienen produciendo hace varias décadas, contribuyendo significativamente al aumento global del nivel del mar [*Rignot et al.*, 2003].

La zona austral del país está caracterizada por sus numerosos canales, fiordos e islas localizados en la fachada occidental de los Andes y por lagos de piedemonte en el lado oriental (Figura 3.1). Esta configuración del territorio favorece la generación del efecto Föhn y gradientes de altura que en combinación con los patrones de circulación general regulan la descarga de humedad en forma de precipitación nivosa, que constituye la principal fuente de alimentación de los campos de hielo patagónicos [*Hall and Visbeck*, 2002; *Garreaud et al.*, 2013].

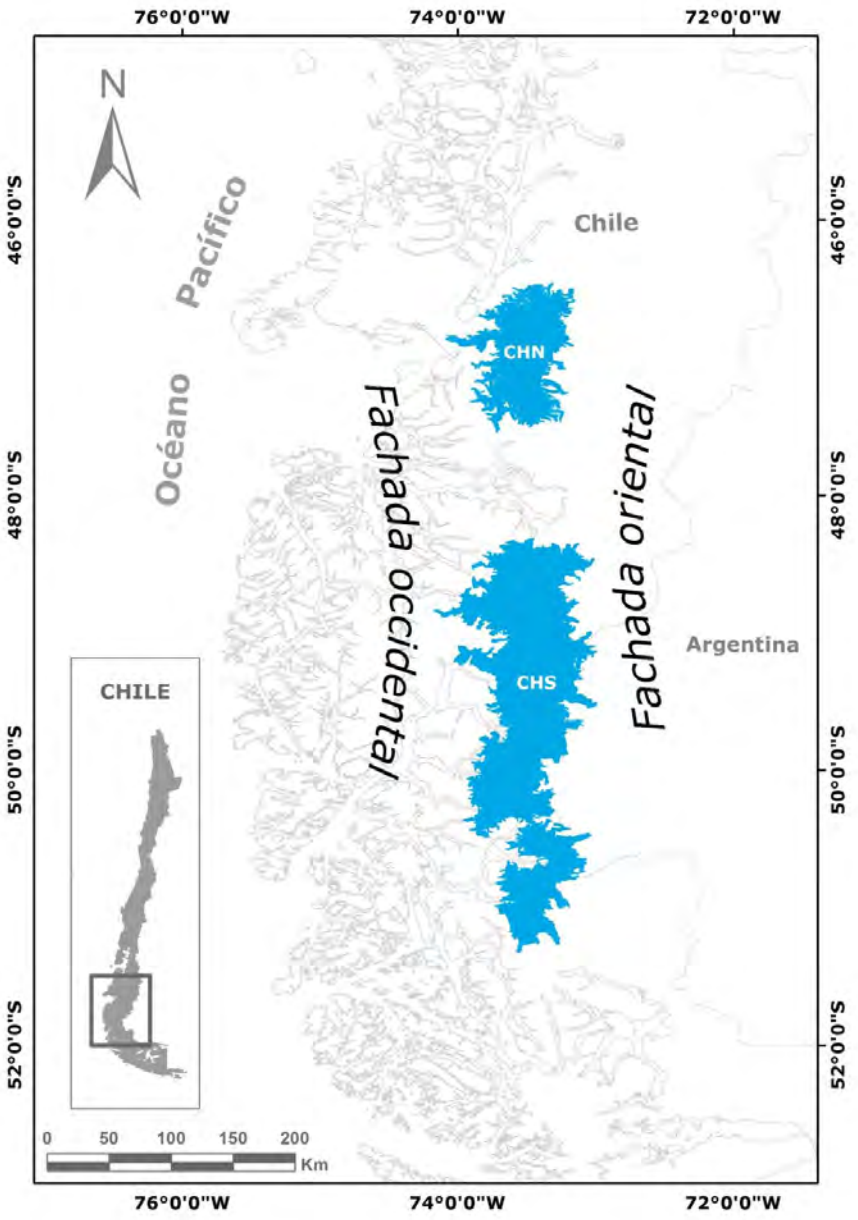


Figura 3.1 Zona austral de Chile, caracterizada por fiordos de fachada occidental y lagos pedemontanos de fachada oriental.

El Campo de Hielo Sur (CHS), se alza como la segunda mayor superficie englaciada del hemisferio austral, destacando la amplia diversidad morfológica y dinamismo que caracteriza a sus glaciares efluentes. Por todo lo anterior, el CHS ha sido objeto de estudio y exploración por parte

de los naturalistas y los especialistas en glaciología por muchas décadas. El primer levantamiento aero-fotogramétrico del área (Trimetrogon) se remonta al bienio 1944-45, con el cual se obtuvieron imágenes oblicuas que fueron empleadas por el Instituto Geográfico Militar (IGM) en la generación de una cartografía preliminar. La superficie del CHS se estimó en unos 13,500 km^2 en base a este material cartográfico [*Lliboutry*, 1956], lo que con el paso de las décadas y el advenimiento de la tecnología satelital se ha actualizado con la ejecución de nuevas investigaciones. Así es como más recientemente se ha reportado una superficie de 13,000 km^2, a partir de imágenes Landsat de mediados de los ochenta [*Aniya et al.*, 1996]. Luego de este estudio se publicó un inventario similar con imágenes también landsat del año 2000 [*Casassa et al.*, 2014], el cual reportó una superficie de hielo de 12,514 km^2 (Figura 3.2). El inventario nacional publicado por la Dirección General de Aguas es el que contiene las cifras más recientes en cuanto a superficie y número de glaciares del CHS, pero no incluye los glaciares que están en territorio Argentino [*DGA*, 2015].

En el CHS se han detectado comportamientos muy diversos de glaciares, con algunos experimentando fuertes retrocesos [*Rivera et al., 2012a*], y en varios casos, aceleramiento de glaciares entre 1984 y 2011 [*Sakakibara & Sugiyama, 2014*]. Estos retrocesos han sido acompañados con una pérdida volumétrica importante [*Willis et al.,* 2012].

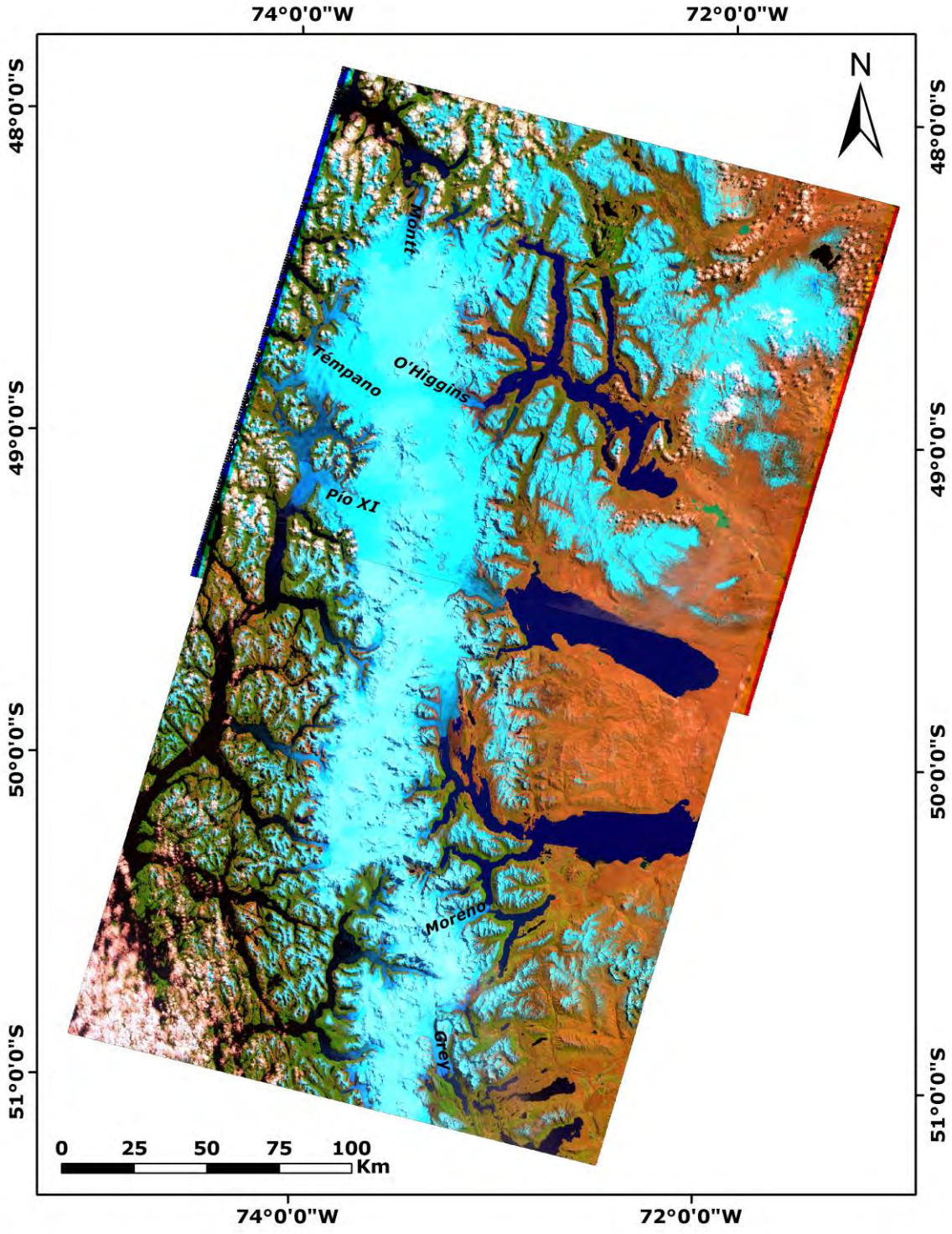


Figura 3.2 CHS representado en un mosaico Landsat ETM+ de gran calidad visual (escena superior, 10/27/2000; escena inferior, 01/14/2001). Se indican los glaciares emblemáticos.

Entre los estudios más representativos de los glaciares de esta zona, están los referidos a las fluctuaciones glaciares de [*Aniya et al.*, 1992], los adelgazamientos descritos por [*Rignot et al.*, 2003; *Rivera*, 2004; *Rivera and Casassa*, 2004; *Raymond et al.*, 2005a] y la aceleración de los flujos más recientes [*Muto and Furuya*, 2013; *Mouginot and Rignot*, 2015]. Pueden agregarse diversos otros estudios, generando gran impacto desde luego los vaciamientos de lagos registrados durante la última década, junto con los drenajes de canales sub-glaciales y los eventos de grandes desprendimientos de témpanos [*Barcaza*, 1999; *Dussaillant et al.*, 2010; *Rivera et al.*, 2012a].

Los glaciares estables son una excepción en el CHS. El Perito Moreno es uno de los más conocidos puesto que su avance sobre la Península de Magallanes bloquea el brazo sur del lago Argentino hasta que se produce una ruptura del hielo que permite el vaciamiento del brazo embalsado [*Skvarca and Naruse*, 1996; *Rott et al.*, 2007; *Sugiyama et al.*, 2011].

El único que ha experimentado avances es el Pío XI, que ha destruido árboles de 300 años, siendo caracterizado como del tipo "galopante" (*surge*), con avances y engrosamientos, inflexión de morrenas centrales y generación de morrenas frontales contemporáneas [*Rivera et al.*, 1997; *Rivera and Casassa*, 1999; *Wilson et al.*, 2016].

Como se desprende de lo anterior, hay una importante diversidad de glaciares en el CHS, siendo la mayoría de ellos, productores de témpanos en fiordos o lagos. Una de las características dinámicas de estos glaciares desprendentes (*calving glaciers)* [*Warren and Aniya*, 1999], es que sus frentes suelen exhibir comportamientos "no-climáticos" [*Post et al.*, 2011] o exacerbación de sus respuestas al clima con gran aceleramiento de flujo, adelgazamiento y colapsos de proporciones [*Aniya et al.*, 1997; *Warren and Aniya*, 1999]. Naturalmente, existen contrastes entre unos y otros

debido entre otros factores a la geometría glaciar, las pendientes superficiales y subglaciares, y las características propias del desprendimiento. En relación a lo último, la profundidad del agua en la zona frontal es uno de los principales mecanismos que explican la posible condición de flotabilidad del hielo [*Warren et al.*, 2001]. De ese modo, la literatura ha ejemplificado la relación entre mayores profundidades y mayores tasas de *calving* [*Pelto and Warren*, 1991; *Skvarca et al.*, 2002]. No obstante lo anterior, la sola profundidad del agua no parece una explicación plena cuando se intenta comprender la dinámica de dichos glaciares a cabalidad. En este sentido, se ha detectado que glaciares sometidos a fluctuaciones de marea tienen una mayor inestabilidad respecto de sus contrapartes que terminan en agua dulce [*Warren et al.*, 1995; *Haresign and Warren*, 2005]. Lejos de aclararse la física detrás de estos fenómenos [*Benn et al.*, 2007], hay varios factores explicativos que pueden mencionarse, como la altura en exceso de flotación [*O'Neel et al.*, 2003] y los cambios periódicos en el nivel de aguas [*Boyce et al.*, 2007].

Con el fin de analizar la dinámica de los glaciares de la parte norte del CHS, se formuló este proyecto, que incluye en el margen occidental a los glaciares Jorge Montt y Témpano:

El Jorge Montt destaca con uno de los registros frontales más extensos de glaciares de *calving* en el CHS (JM en Figura 3.3), el cual fluye con rumbo norte por unos 30 km desde las nacientes en el *plateau* hasta su desprendimiento en un fiordo interior del Canal Baker. Sus ~20 km de retroceso en el siglo pasado, por cierto un *record* histórico en Patagonia [*Rivera et al.*, 2012b], sumado a su fuerte adelgazamiento [*Rignot et al.*, 2003] y a un aumento de sus velocidades [*Enomoto and Abe*, 1983; *Rivera et al.*, 2012a; *Mouginot and Rignot*, 2015], lo posicionan entre los de mayor dinamismo del CHS.

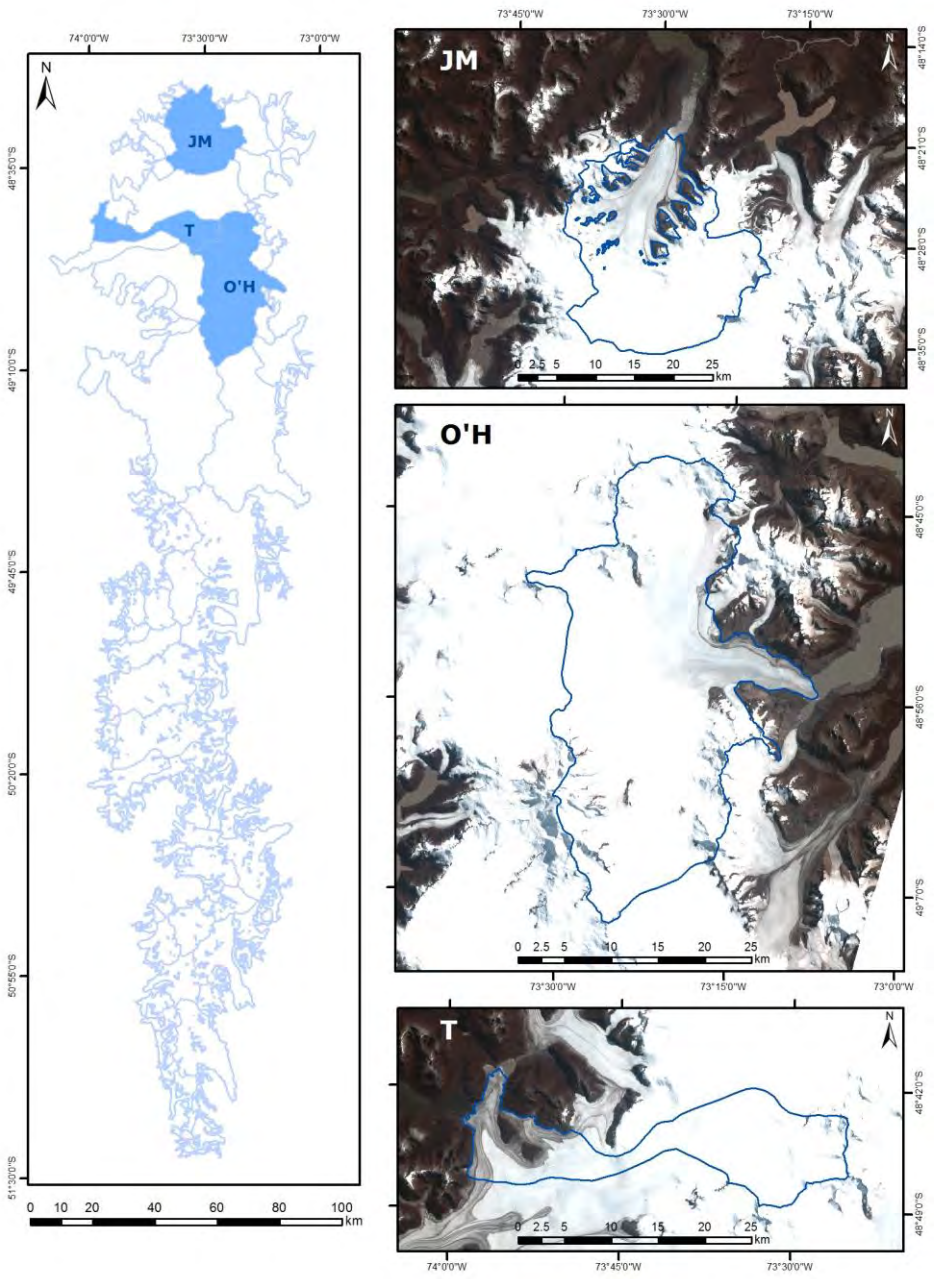


Figura 3.3 Izq. Los tres glaciares del sector norte del CHS en destacado (JM, O'H y T). Der. Imágenes ampliadas en base a escena Landsat OLI (03/12/2016).

Más al suroeste, se localiza el glaciar Témpano (T en Figura 3.3), cuyo retroceso [*DGA*, 2011] constituye la génesis del vaciamiento sufrido por el lago homónimo hace ya nueve años en un evento del tipo "IDLOF" (*Ice-*

Damned Lake Outburst Flood), un fenómeno recurrente en este y otros glaciares de la región, como los provenientes desde el Lago Cachet 2 y el Glaciar Colonia [*Dussaillant et al.*, 2015].

Por la "fachada oriental" se seleccionó el glaciar O'Higgins (O'H en Figura 3.3), el que retrocedió más de 15 km en el lapso de un siglo (Rivera *et al*., 2000; Casassa *et al*., 1997). Este también es un glaciar que produce témpanos, esta vez en el lago homónimo cuya cota superficial es de ~ 250 m snm.

3.3 Objetivos

3.3.1 General

Describir la evolución glaciar reciente y los patrones glacio-dinámicos en las fachadas occidental y oriental del Campo de Hielo Patagónico Sur.

3.3.2 Específicos

- Determinar variaciones de frentes y áreas englaciadas en escalas inter e intra-anuales en períodos recientes en los casos de Jorge Montt, Témpano y O'Higgins.
- Caracterizar los campos de velocidades en el frente actual de los tres glaciares mencionados.
- Determinar flujos de *calving* actuales para los tres glaciares mencionados.
- Examinar correlaciones posibles entre la dinámica glaciar y el entorno de *calving*.

3.4 Materiales y métodos

3.4.1 Delimitación de contornos de glaciares y sus cambios

Se obtuvo un set de imágenes de satélite ya orto-rectificadas que se centran en el sector norte del CHS (Tabla 3.1). Se procedió a su co-registro en base al modelo WGS84 y la proyección Universal Transversal de Mercator (UTM 18S).

Las divisorias glaciares, frentes y otros parámetros espaciales, han sido procesados con las herramientas SIG habituales (ENVI y ArcGis v10.3). Se ha calculado los cambios frontales entre pares de imágenes considerando tres mediciones (ambas márgenes y línea central), ajustándose así a los criterios metodológicos y rangos de precisión tradicionales [*Paul et al.*, 2013].

Tabla 3.1 Set satelital empleado.

Sensor	Resolución (m)	Rango de fecha de imágenes (MM/DD/AAAA)	Fuente**
Aster	15 (MS)*	12/13/2011 al 04/12/2016	LPDAAC
Landsat ETM+	15 (PAN)*	01/21/2012 al 07/26/2016	USGS
Landsat OLI	15 (PAN)*	05/23/2013 al 08/19/2016	
Sentinel	10 (PAN)*	01/28/2016	ESA

*MS: Banda multiespectral; PAN: Banda pancromática.

**USGS: United States Geological Survey; LP DAAC: Land Processes Distributed Active Archive Center; ESA: European Space Agency.

3.4.2 Velocidades de hielo mediante técnicas de *feature tracking*

El set de imágenes capturadas desde el mes de mayo de 2014 desde las zonas periféricas a los glaciares (Figura 3.3) permitió hacer uso de las técnicas fotogramétricas aplicadas con buenos resultados en años

recientes [*Rivera et al.*, 2012a; *Maas et al.*, 2013]. A lo largo de este proyecto se logró un registro relativamente continuo en los casos de Jorge Montt y Témpano, no así en el glaciar O'Higgins donde hubo algunas interrupciones debido a fallas descritas en la sección 8.4.3 del presente informe.

Para la geo-referenciación de las imágenes se utilizó la red fotogramétrica basada en el punto de cámara fija y apoyos laterales, además de los ajustes adicionales mediante los modelos de elevación disponibles, principalmente data SRTM, Aster y LiDAR 2015, estos últimos generados específicamente para este proyecto. De ese modo, se logró comparar algunas secuencias de imágenes de buena calidad visual para lograr derivar velocidades promedio en las zonas frontales.

La cámara instalada en el glaciar Jorge Montt (Figura 3.4) fue orientada con una desviación de 65º al sur en relación al eje longitudinal (coordenadas este), con lo cual se cubrió una extensión de unos ~4 km lineales dentro del glaciar. El ajuste se optimizó con el Aster-DEM (3N y 3B) del 9 enero de 2016 (Tabla 3.1), el cual debió ser calibrado mediante análisis de residuales luego de su comparación con la data LiDAR generada durante este proyecto (más detalles en el capítulo referido al análisis de cambios de elevación).

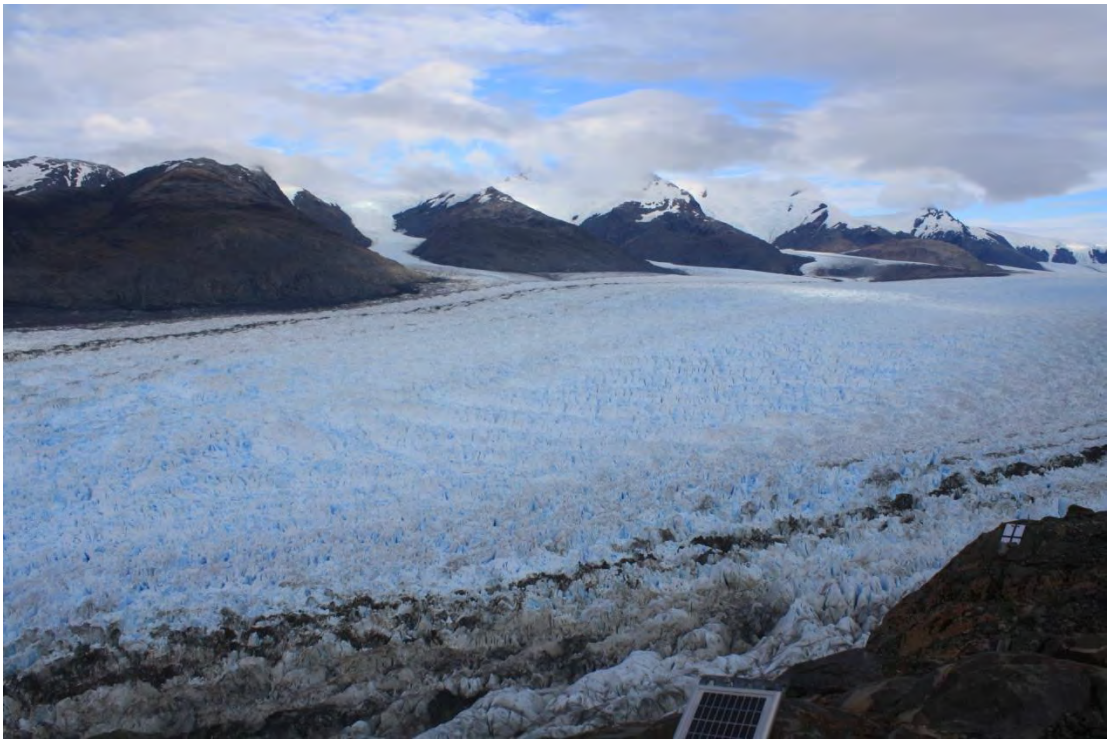


Figura 3.4 Ejemplo de panorámica del Jorge Montt el día 24 de abril del 2015.

El error medio cuadrático (RMSE) de las coordenadas-imagen y los puntos de control (GCP) de 0.3 pixeles (subdecimétrico) hace factible una superposición muy adecuada entre el modelo de elevaciones generado y capturas fotográficas de buena calidad (Figura 3.5). Sobre la porción de superficie visible se generó una grilla equidistante de 25 m (Figura 3.6) para efectuar el seguimiento de patrones por correlación cruzada [*Giles et al.*, 2009; *Zemp et al.*, 2013], en el cual se corrigieron influencias vibratorias según los ángulos de Euler. Estos se determinaron en promedios de -0.0288° (guiñada), -0.0049° (cabeceo) y -0.0371° (alabeo), haciendo suponer que el sistema de cámara fija no ha alterado la escena capturada [*Schneider and Maas*, 2004].

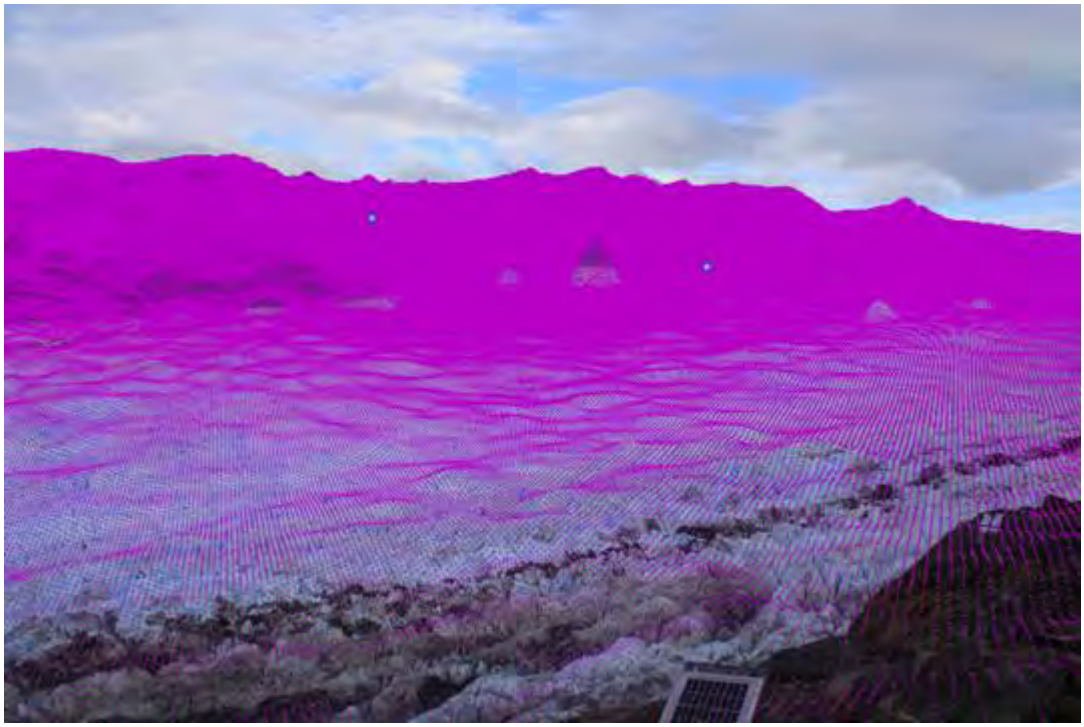


Figura 3.5 Superposición del modelo digital de elevación sobre captura fotográfica del glaciar Jorge Montt del 24 de abril del 2015.



Figura 3.6 Grilla de puntos monitoreados en la porción visible del glaciar Jorge Montt y ajustada con el modelo digital de elevación.

La cámara inicialmente instalada en Témpano en su margen Sur con un ángulo de 10º respecto al este fue reorientada en octubre de 2014, quedando a los 105º desviada del este. Esta modificación permitió mejorar la visualización y cubrir unos 1.5 km del glaciar. Se ilustran ambas panorámicas (Figura 3.7 y Figura 3.8).



Figura 3.7 Panorámica del glaciar Témpano en el sitio inicial, el día 9 de junio de 2014.



Figura 3.8 Panorámica del glaciar Témpano desde octubre de 2014 a abril de 2015.

En Témpano también se obtuvo correspondencia entre las coordenadas imagen (bidimensionales) y las topográficas (tridimensionales) provistas por el DEM-Aster de 9 de enero de 2016 por ajuste por mínimos cuadrados mediante la rotación y traslación de coordenadas del sistema 2D [*Corripio*, 2004; *Maas et al.*, 2010, 2013; *Rivera et al.*, 2012a]. De ese modo, se geo-referenciaron las fotografías al modelo 3D. Se realizó dicho procedimiento para las dos vistas generadas durante este proyecto (Figura 3.9 y Figura 3.10).



Figura 3.9 Ajuste generado para la vista fotográfica del glaciar Témpano en el período mayo- octubre 2014.



Figura 3.10 Ajuste generado para la vista fotográfica del glaciar Témpano en el período octubre 2014-abril 2015.

Las grillas equidistantes empleadas (25 m) en las zonas visibles captadas por la cámara fija permitieron hacer el seguimiento de patrones (Figura 3.11, Figura 3.11 y Figura 3.12). En dicho proceso de seguimiento [*Giles et al.*, 2009; *Zemp et al.*, 2013], se corrigieron los ángulos de Euler estimados en promedios de -0.035° (guiñada), -0.0042° (cabeceo) y -0.0540° (alabeo).

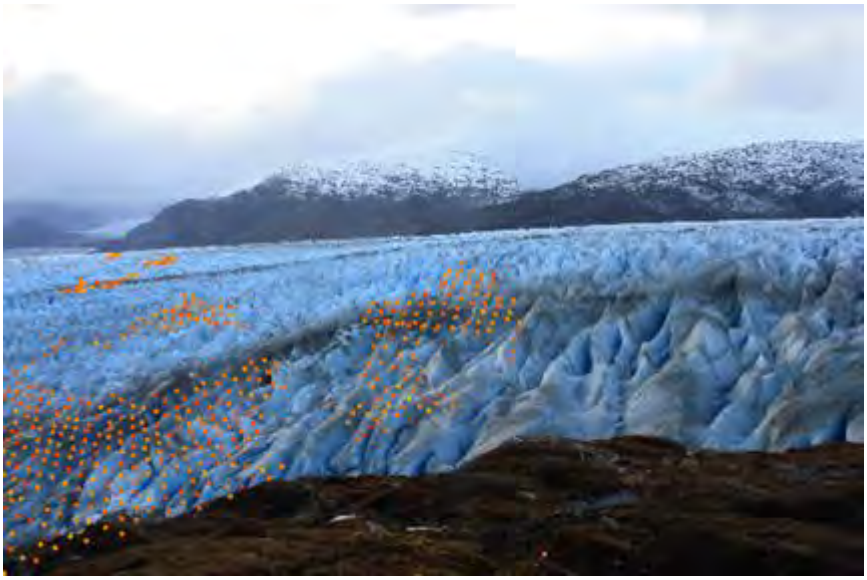


Figura 3.11 Grilla de puntos monitoreados en la porción visible del glaciar Témpano y ajustada en la vista inicial.



Figura 3.12 Grilla de puntos monitoreados en la porción visible del glaciar Témpano y ajustada en la vista final.

La cámara de O'Higgins se instaló con un ángulo de 105º hacia el este, que de ese modo capta una menor porción glaciar en la transversal. Longitudinalmente, el área cubierta es de ~1.4 km de hielo (Figura 3.13). El procedimiento de geo-referenciación se inició con el ajuste por mínimos cuadrados y el efecto de co-linealidad [*Elnima*, 2015] para obtener

coordenadas imagen 2D (Figura 3.14) en un sistema proyectado con una precisión superior a 2 píxeles.



Figura 3.13 Panorámica del glaciar O'Higgins el día 11 de mayo de 2014.



Figura 3.14 Superposición de modelo 3D y captura fotográfica del día 24 de abril del 2015.

De tal manera, se logró proceder con el monitoreo de desplazamientos en el hielo en una grilla equidistante de 25 m (Figura 3.15) en la zona visible

del glaciar. Luego de los habituales procesos de corrección de ángulos eulerianos; -0.015° (guiñada), -0.0022° (cabeceo), y -0.0230° (alabeo), se verificó que éstos eran los más bajos registrados en los tres sistemas instalados.



Figura 3.15 Grilla de puntos monitoreados en la porción visible y ajustada del glaciar O'Higgins.

El trabajo fotogramétrico se complementó con *feature tracking* satelital, en particular utilizando la herramienta CosiCorr [*Kääb*, 2002; *Heid and Kääb*, 2012] para analizar bandas pancromáticas disponibles en el set de datos (Tabla 3.1). Se obtuvieron velocidades en fechas de invierno y verano haciendo correlaciones cruzadas limitadas a períodos de días o pocas semanas entre los años 2013 y 2016, verificándose las magnitudes y campos de flujo obtenidos con técnicas fotogramétricas.

3.4.3 Flujo de *calving*

Definido como el volumen anual de descarga de témpanos, éste ha sido calculado con los parámetros enumerados por [*Cuffey and Paterson*, 2010] en base a mediciones durante el proyecto, la interpretación de las imágenes satelitales y parámetros teóricos (Tabla 3.2). Se estimaron flujos de *calving* anual y en algunos períodos más limitados en el año.

Tabla 3.2 Parámetros empleados en calcular flujo de calving.

Parámetro de entrada	**Unidad**
Ancho frontal, L	m
Rango de elevación cerca del frente glaciar, Δz	m snm
Profundidad promedio del agua cerca del frente, H	m
Altura de la pared de hielo sobre el agua e el frente, h	m
Sección batimétrica cerca del frente, LH	km^2
Pendiente superficial en Δz, θ	Deg
Velocidad superficial promedio en Δz, V_i	m/d
Densidad del hielo, ρ_i	kg/m^3
Densidad del agua, ρ_w	kg/m^3
Cambio frontal, $\frac{\partial L}{\partial t}$	m/d
Constante de aceleración gravitacional, g	m/s^2
Parámetro creep, A	$s^{-1}\ Pa^{-3}$
Flujo de *calving*, c	km^3/a
Altura de hielo en exceso de flotación, F	m

Esta aproximación se resume en las ecuaciones siguientes:

$$U_i = V_i - 0.1 * A * (\rho_i * g * sin\theta)^3 H^4 \quad \textbf{(3.1)}$$

$$U_c = U_i - \frac{\partial L}{\partial t} \quad \textbf{(3.2)}$$

$$c = U_c * LH \quad \textbf{(3.3)}$$

$$F = (h + H) - H\rho_w/\rho_i \quad \textbf{(3.4)}$$

Donde la velocidad promedio seccional, U_i, se obtiene a partir de la velocidad promedio superficial, V_i, el parámetro de *creep*, A, la densidad del hielo, ρ_i, la aceleración gravitacional, g, la pendiente superficial, θ, y la altura sobre el nivel del agua, F. Luego, la velocidad de *calving,* U_c, también requiere conocer el cambio frontal, $\frac{\partial L}{\partial t}$, para finalmente determinar el flujo de *calving*, c.

La altura en exceso de flotación, F, resulta del balance entre las fuerzas opuestas entre el agua y el hielo de respectivas densidades ρ_i y ρ_w. A menor valor de F, mayor posibilidad de flotación del hielo y mayor flujo de *calving*.

3.5 Resultados

3.5.1 Fachada occidental

3.5.1.1 Cambios frontales

Se indican los valores de variación frontal obtenidos en los glaciares de *calving* que terminan en fiordos. En el Jorge Montt ha tenido un retroceso muy fuerte con el colapso de su zona baja en las últimas 4 décadas (Figura 3.18) lo que ha generado una expansión del fiordo Jorge Montt en 24 km^2 entre 1976 y 2016. En los últimos cuatro años (Figura 3.17), se mantuvo un fuerte y sostenido retroceso frontal con una pérdida areal de 2 km^2, sin embargo, las tasas han experimentado una alta variabilidad, destacándose retrocesos mayores en verano (Figura 3.18). También es interesante que el frente no se comporte al unísono en toda su extensión, puesto que algunas porciones retroceden mientras que otros segmentos pueden presentar avances menores.

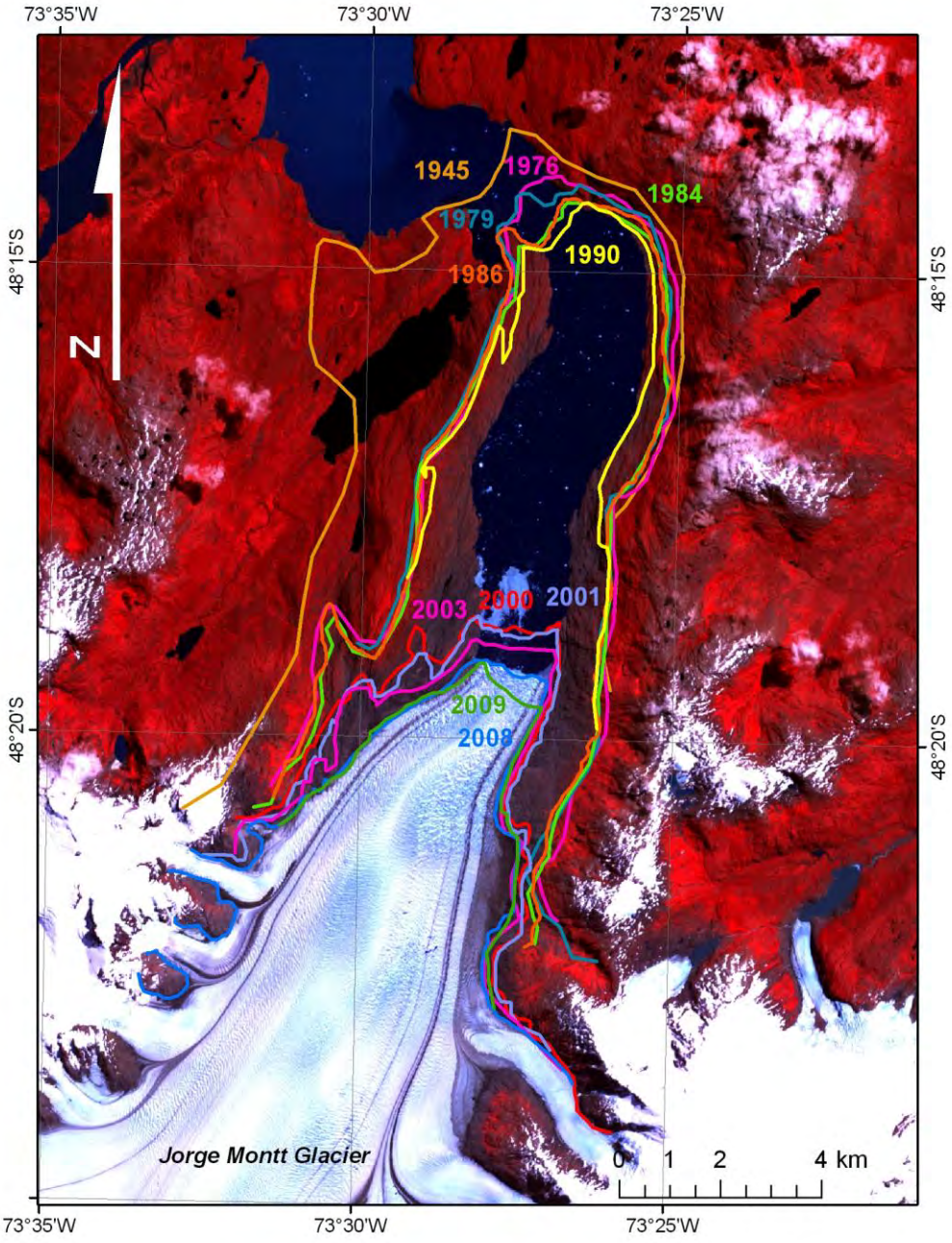


Figura 3.16 Variaciones del glaciar Jorge Montt desde 1945 [*Rivera et al.*, 2012b].

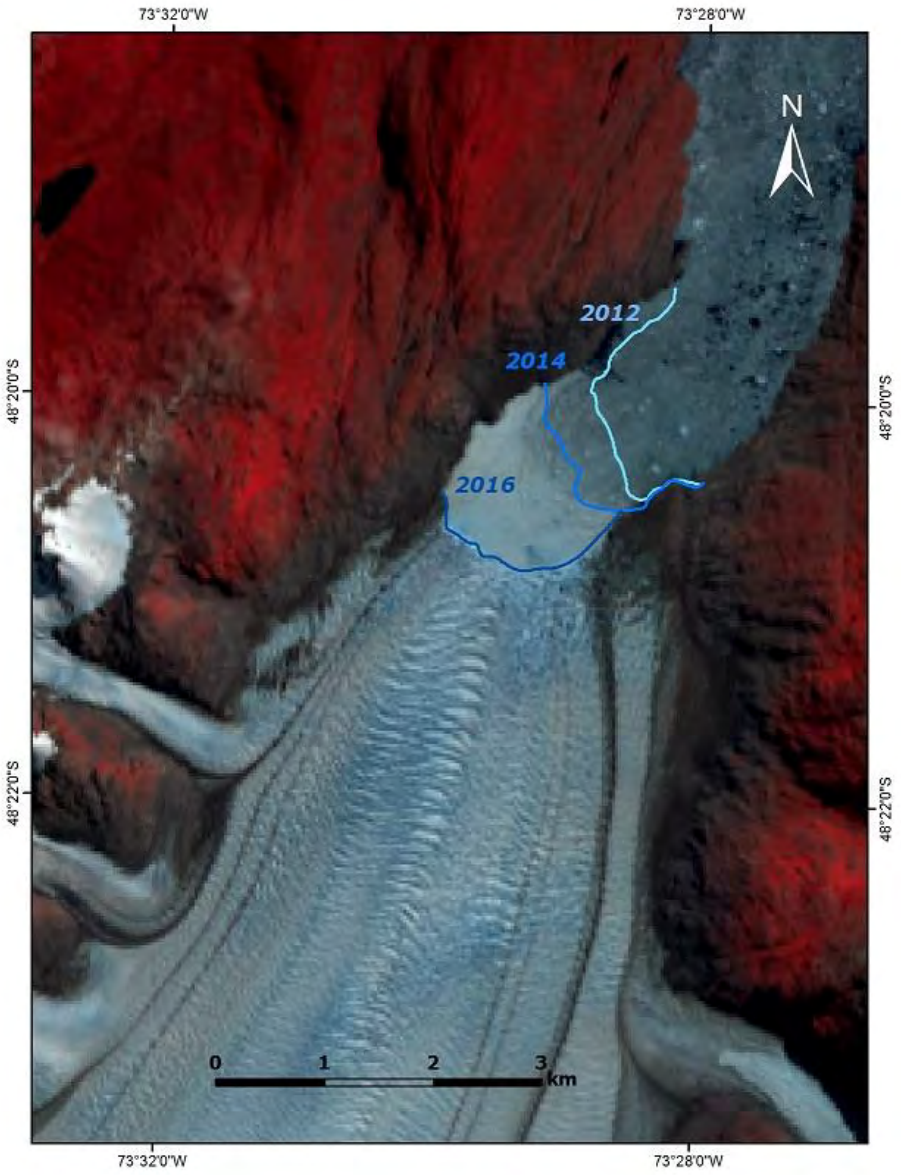


Figura 3.17 Variaciones del glaciar Jorge Montt desde 2012.

Tabla 3.3 Variación frontal neta (m) entre fechas indicadas y tasas en períodos anuales (m/a) recientes en Jorge Montt.

Fecha (MM/DD/AAAA)	m	m/a
02/19/2011	0	-716 (2010-2011)* -723 (2011-2012) -206 (2012-2013) -190 (2013-2014) -754 (2014-2015) -265 (2015-2016) **-403 (2014-2016)****
07/29/2011	-198	
01/21/2012	-286	
02/22/2012	177	
03/25/2012	-97	
04/26/2012	127	
06/13/2012	-54	
09/01/2012	76	
03/12/2013	-162	
09/28/2013	-59	
04/01/2014	-109	
01/14/2015	-595	
01/09/2016	-262	
03/12/2016	-253	

*[*Rivera et al.*, 2012b].

**Este valor fue usado para el cálculo de la tasa de *calving* anual.

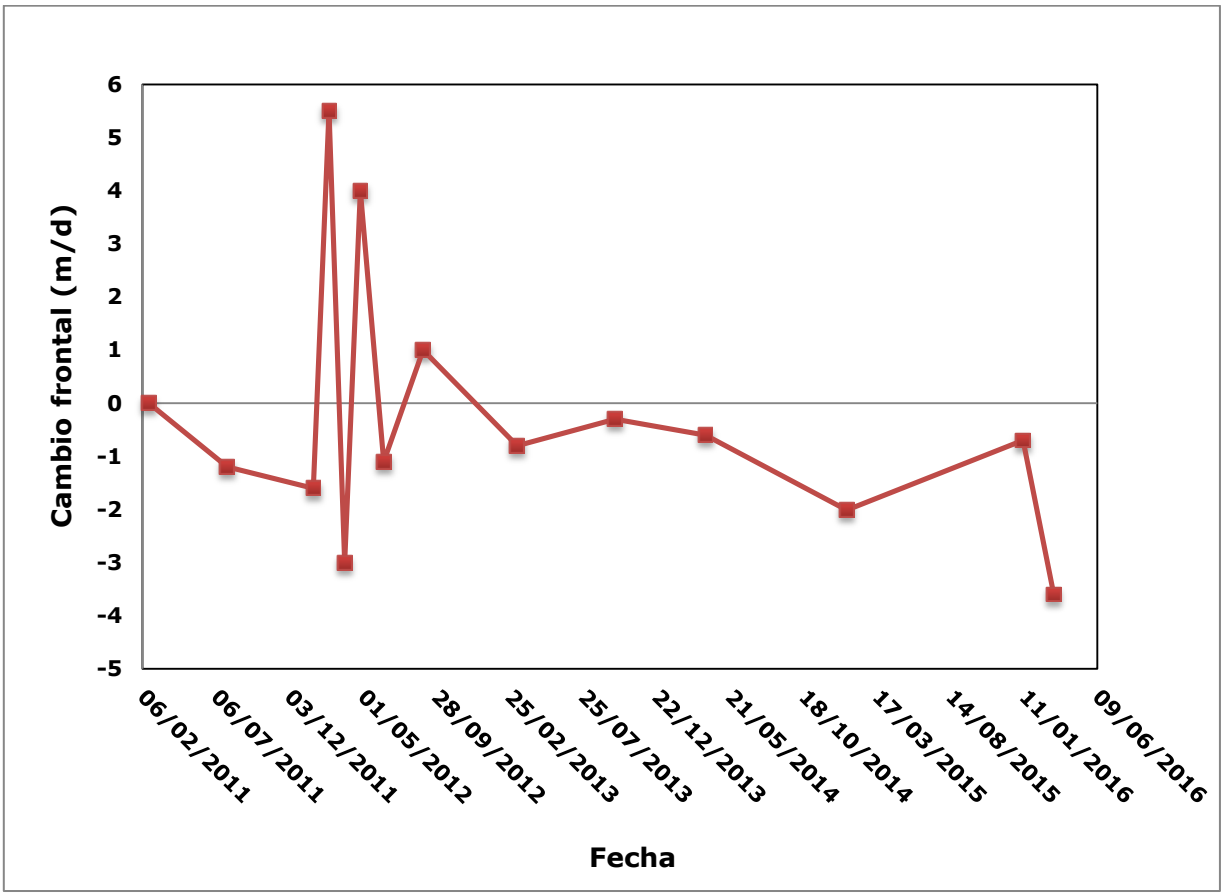


Figura 3.18 Variaciones frontales de Jorge Montt expresadas en m/d.

El área englaciada en el año 2016 para el Jorge Montt es de 447 km^2. Junto al reciente retroceso ha habido varias modificaciones en la zona de *calving,* con la aparición de nuevos promontorios rocosos y un ligero incremento en pendientes laterales y frontales. Las tasas de retroceso frontal, en términos generales, han disminuido respecto a la década de los ‘90 (Rivera *et al*., 2012a), lo que en parte obedece a las condiciones batimétricas variables a lo largo y ancho del fiordo donde termina el glaciar. Los espesores de hielo en la zona del desprendimiento no se han logrado verificar por completo (sección 6.5), sin embargo con los datos disponibles es posible concluir que la topografía subglacial inmediatamente aguas arriba del frente actual está cerca del nivel del mar, por lo que se

estima que el frente podría tender a estabilizarse en el futuro, en la medida que una menor profundidad del frente permita reducir la tasa de *calving* actual. No obstante lo anterior, la topografía subglacial a unos 3 km aguas arriba de la posición actual vuelve a estar bajo el nivel del mar, por lo que en caso de que el frente retroceda hasta esta posición, el frente podría volver a desestabilizarse, produciendo un colapso frontal como el experimentado en años recientes.

En el glaciar Témpano, los cambios frontales de largo plazo han sido importantes (Figura 3.19), pero son de un orden de magnitud inferiores a los del Jorge Montt. Estos cambios frontales históricos han generado una expansión del lago que se formó entre el Témpano y Bernardo, lago que experimentó un repentino vaciamiento en el año 2007, y una expansión del fiordo Témpano de 6.9 km^2 desde 1945 hasta 2016, e los cuales el 87% se dieron desde 1976 a 2016.

En el Témpano el cambio de área de este glaciar en el periodo 2012-2016 fue de -0.6 km^2 (Figura 3.20), sin embargo no se visualizan cambios estacionales, aunque en los últimos 4 años, hay diferencias importantes entre lo que ocurre en su frente norte (TN) que termina en un lago proglacial y su frente Occidental (TW) que termina en el fiordo homónimo. Hay varios periodos sin cambios significativos (Tabla 3.4), con la excepción del 2013 (Figura 3.21). El área total para el año 2016 es de 258 km^2. La topografía del glaciar en la parte baja es más abrupta (>10°) y termina en un fiordo más somero, lo que explica la baja tasa de flujo de hielo. De igual modo, los bajos espesores de hielo en la zona de *calving* actual y por algunos km aguas arriba [*Gourlet et al.*, 2016], implican que la topografía subglacial está por encima del nivel el mar, reduciendo las posibilidades de flotabilidad del frente, por lo que de mantenerse la tendencia de retroceso

actual, las tasas de calving seguirán siendo bajas, no vislumbrándose posibilidades de colapso en el corto plazo.

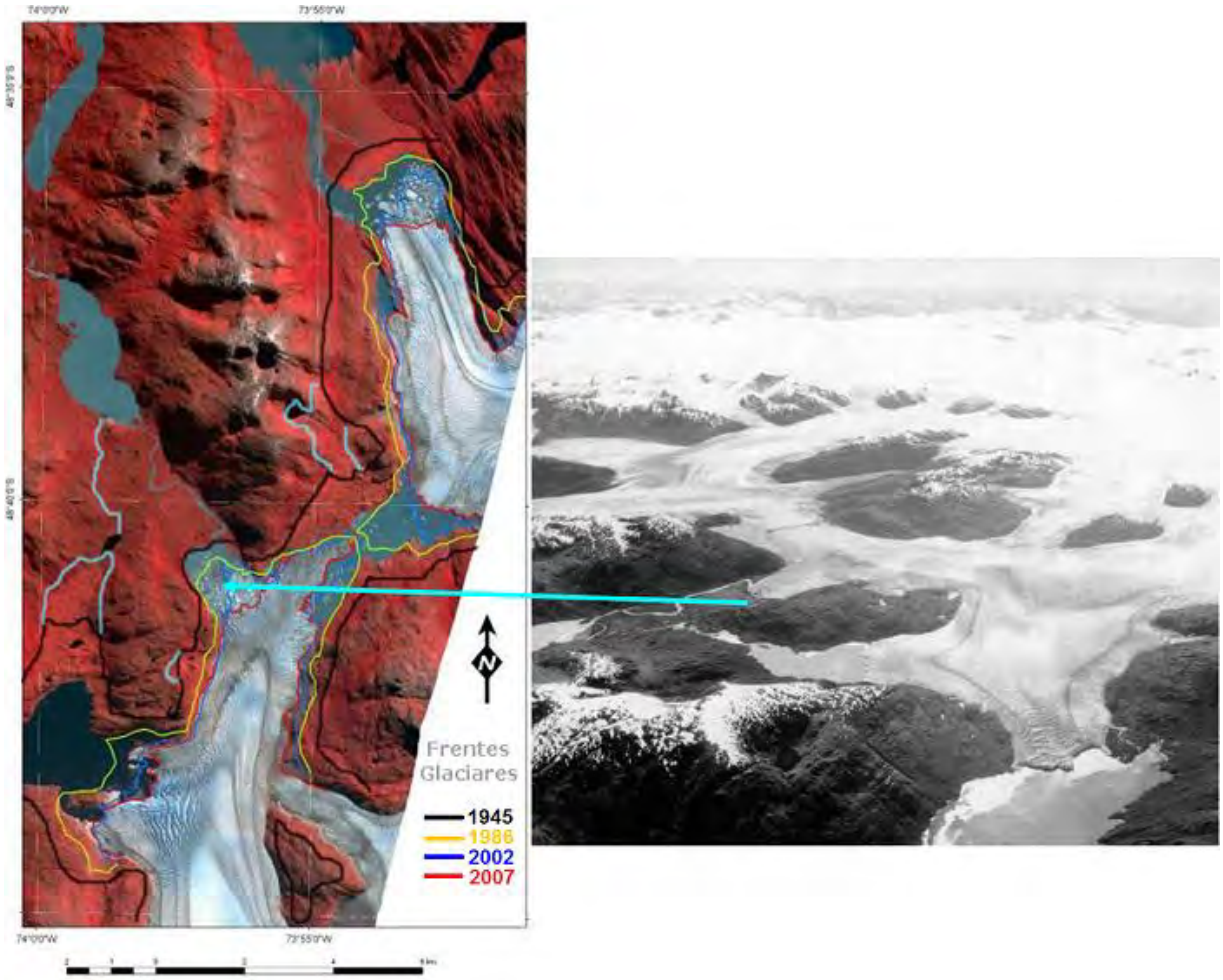


Figura 3.19 Cambios frontales 1945-2007 de Glaciar Témpano y Bernardo.

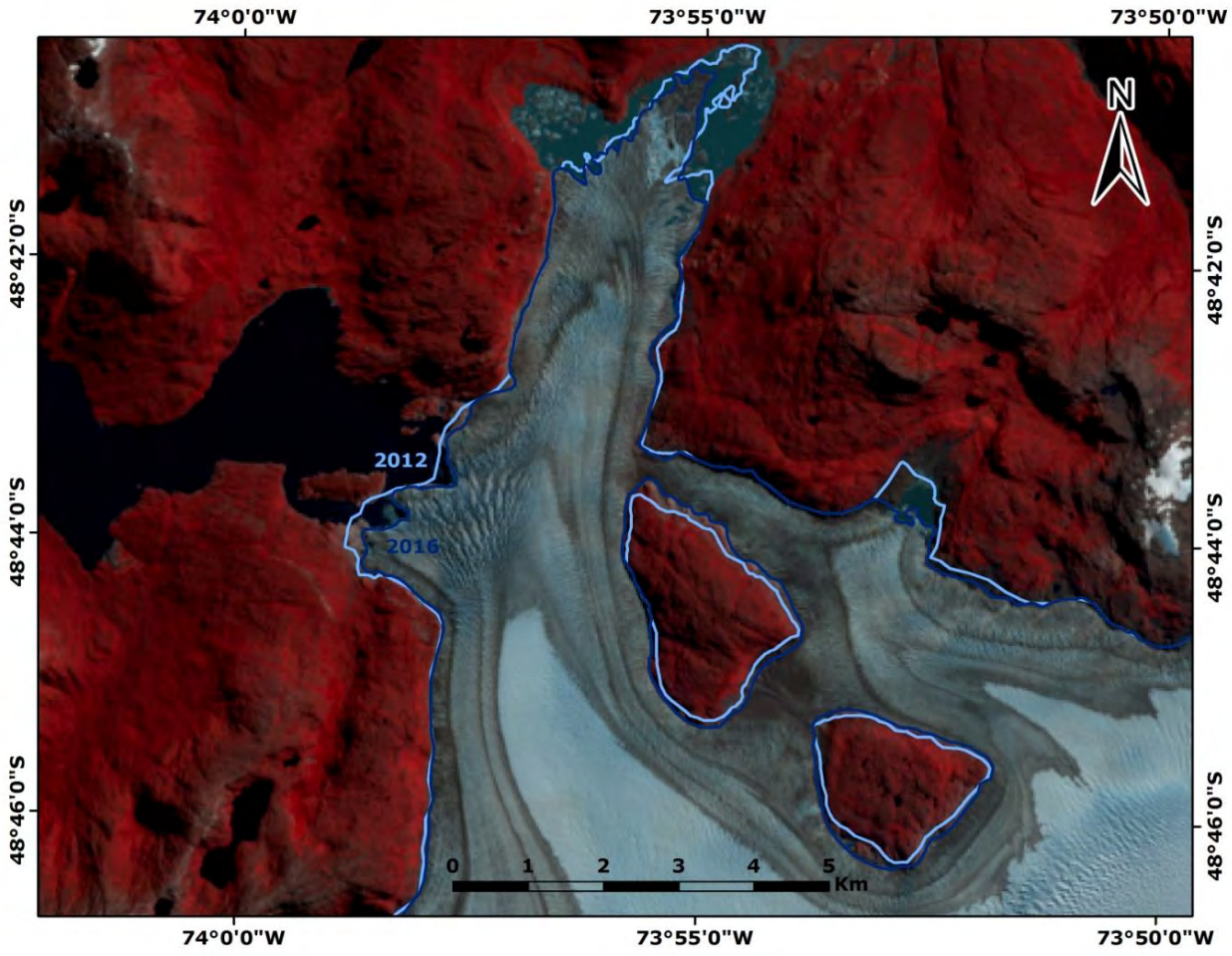


Figura 3.20 Variaciones del glaciar Témpano desde 2012.

Tabla 3.4 Variación frontal neta (m) entre fechas indicadas y tasas en períodos anuales (m/a) recientes en Témpano frente occidental (TW) y frente norte (TN).

Fecha MM/DD/AAAA	m		m/a
	TW	TN	TW
12/13/2011	0	0	-29 (2012-2013) -237 (2013-2014) -63 (2014-2015) -129 (2015-2016 **-143 (2014-2016)***
02/29/2012	0	0	
02/24/2013	430	513	
03/12/2013	-365	-136	
03/28/2013	-111	-18	
04/07/2014	-475	152	
08/02/2014	47	-861	
11/02/2014	0	551	
01/14/2015	0	501	
01/21/2015	64	18	
01/09/2016	-75	-782	
02/01/2016	-17	0	
03/12/2016	0	-360	
04/12/2016	-80	138	
05/31/2016	0	-139	
07/05/2016	0	0	
07/26/2016	0	705	
08/19/2016	0	-82	

*Este valor fue usado para el cálculo de la tasa de *calving* anual.

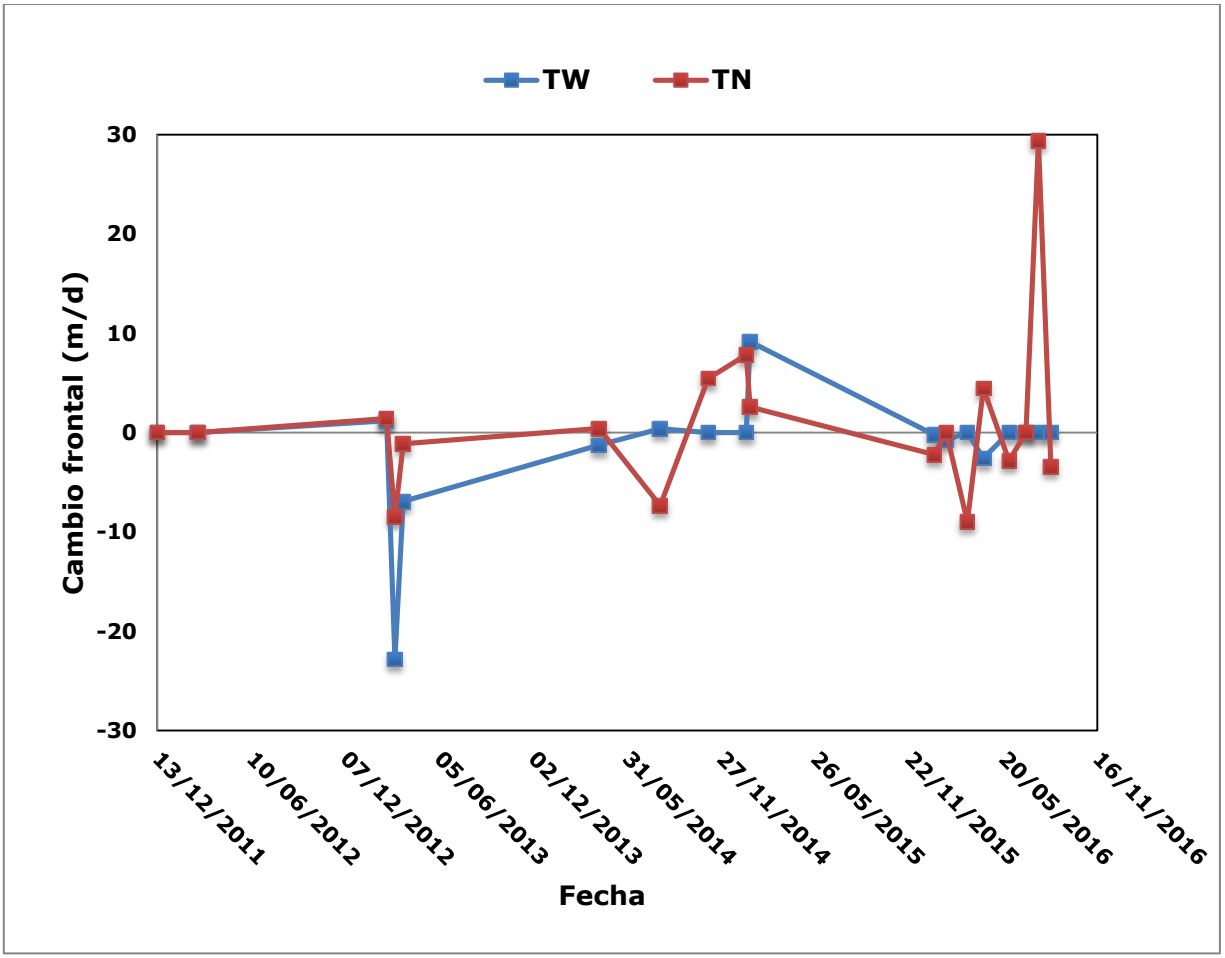


Figura 3.21 Variaciones frontales de Témpano expresadas en m/d.

3.5.1.2 Velocidades de hielo

Con las fotos obtenidas por las cámaras fijas desde el año 2014 se obtuvieron altas velocidades superficiales del hielo con un promedio de 18±2 m/d para la zona frontal del glaciar Jorge Montt (Figura 3.22). Se aprecia un área más activa entre la línea central y el margen oriental, en circunstancias que el resto del frente aparece menos dinámico. Los 18 m/d se considera un número representativo de la zona de *calving* dada la distribución de los campos vectoriales en el glaciar.

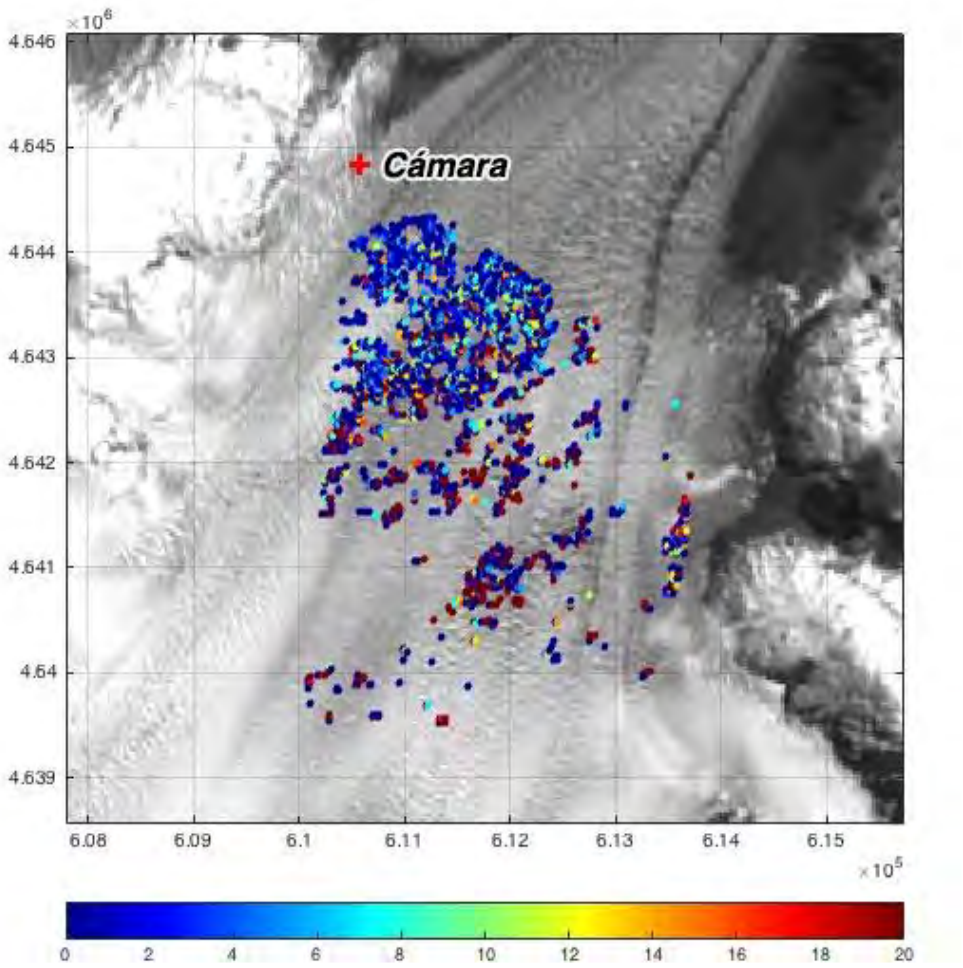


Figura 3.22 Velocidades de hielo promedio (m/d) en la zona visible del Glaciar Jorge Montt.

Mediante *feature tracking* satelital, se determinaron velocidades de pocos m/a en la zona de acumulación, las que tienen un fuerte aumento aguas abajo del *plateau*, especialmente a la altura de la Línea de Equilibrio (ELA) que se ubica aproximadamente a ~1100 m snm (Figura 3.23). En la zona próxima al frente de *calving* se observa una particular aceleración del hielo (Figura 3.24), con velocidades muy similares a las obtenidas por fotogrametría. Este análisis también sugiere una dicotomía entre fines de verano y el resto del año, puesto que allí las velocidades se incrementan significativamente respecto de otros meses medidos (Tabla 3.5).

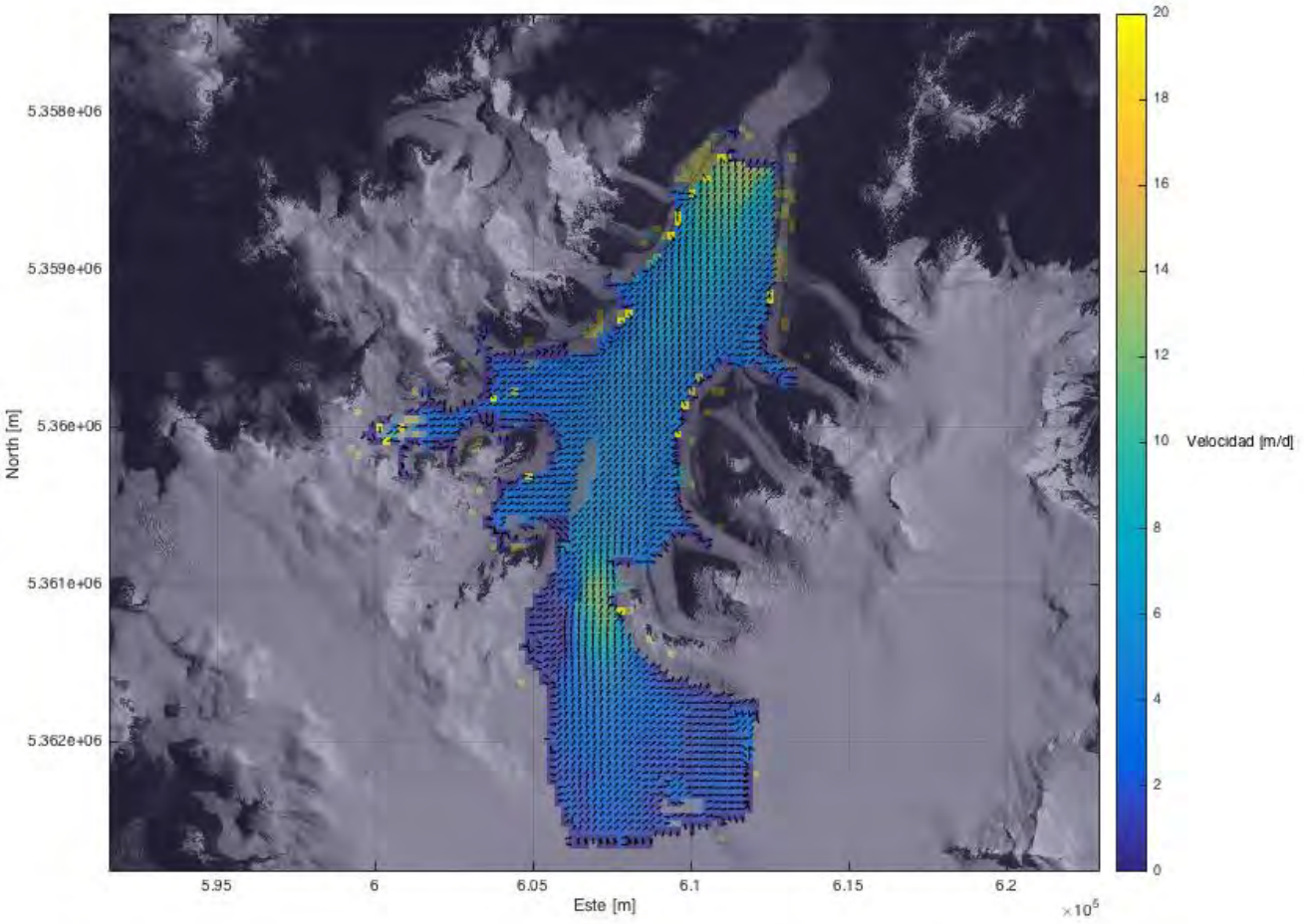


Figura 3.23 Vectores de flujo de hielo en el glaciar Jorge Montt obtenidos con *feature tracking* entre los días 14 y 21 de enero de 2016.

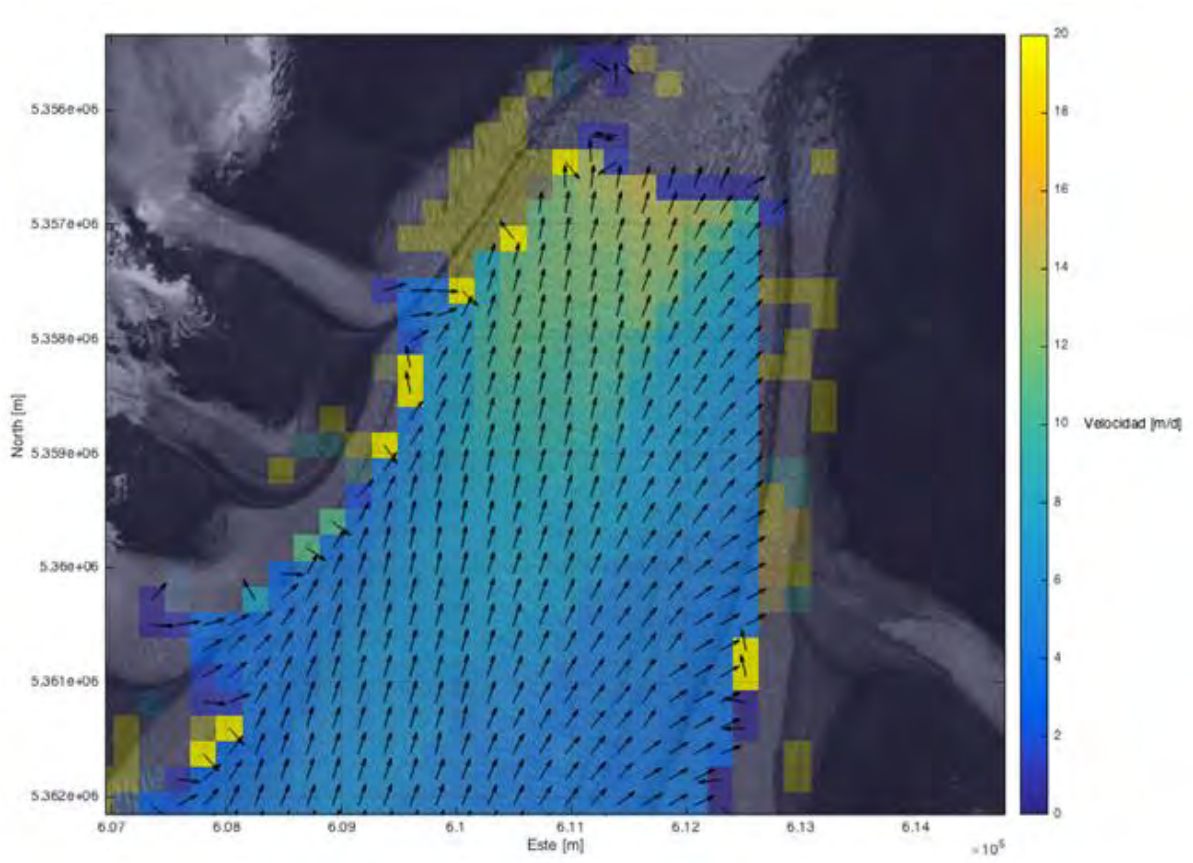


Figura 3.24 Acercamiento al mapa de vectores de flujo de hielo en la parte baja del glaciar Jorge Montt en el período mencionado en Figura 3.23.

En el glaciar Témpano se obtuvieron velocidades superficiales promedio de 3.8±0.8 m/d (Figura 3.25), las que son más bajas que las del Jorge Montt. La zona occidental del Témpano es más dinámica que el resto del frente, lo que se explica por el calving en el fiordo más profundo que el lago proglacial en la parte norte. En el campo de vectores obtenidos mediante *feature tracking,* se verifican las menores velocidades en este glaciar (Figura 3.26). Adicionalmente se observó que las velocidades de verano han disminuido entre el 2013 y el 2016 (Tabla 3.5) pese a continuar su retroceso, lo que si bien no es un pleno reflejo del ciclo anual puede sugerir una tendencia a mayor estabilidad.

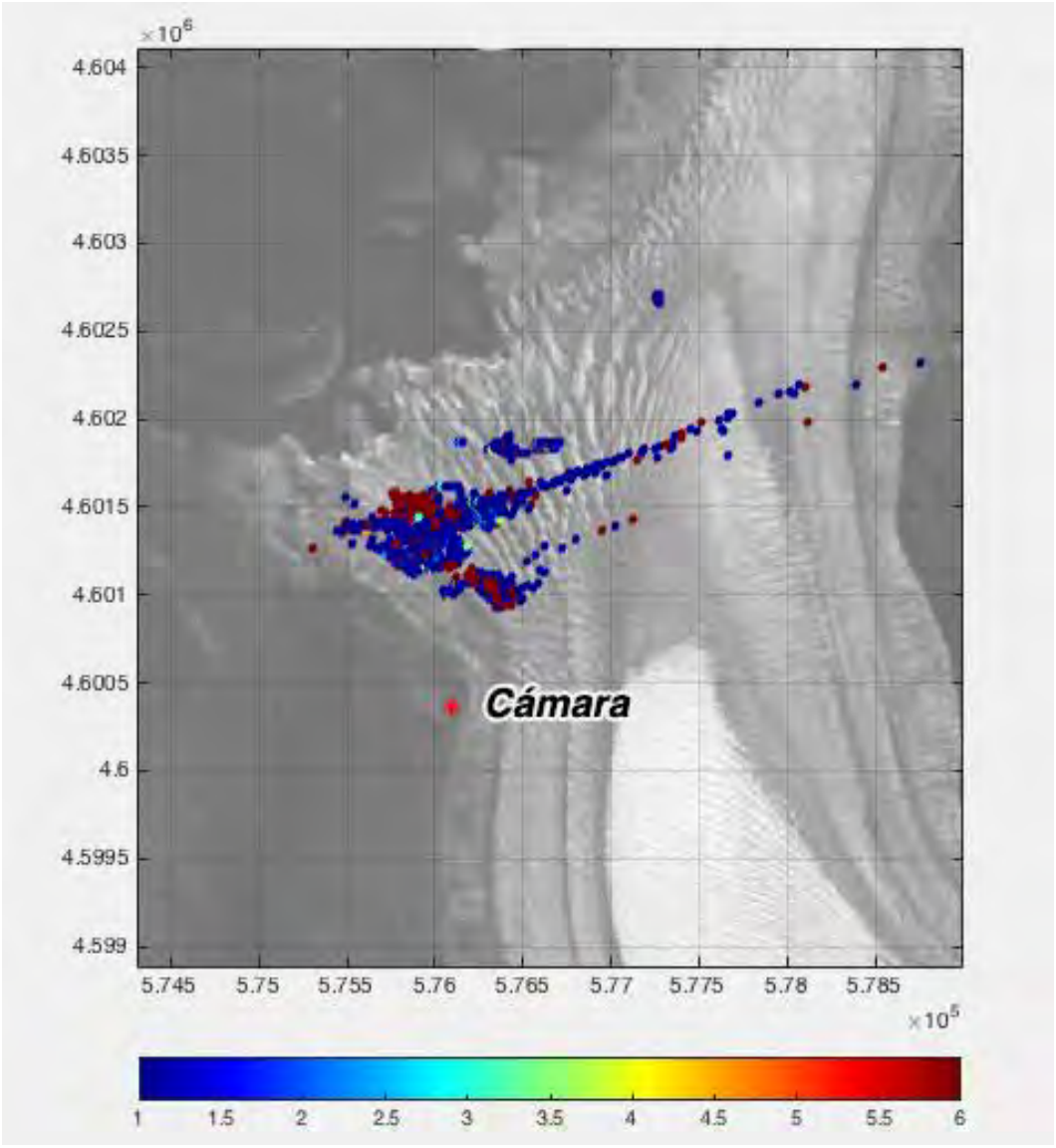


Figura 3.25 Velocidades de hielo promedio (m/d) en la zona visible del Glaciar Témpano.

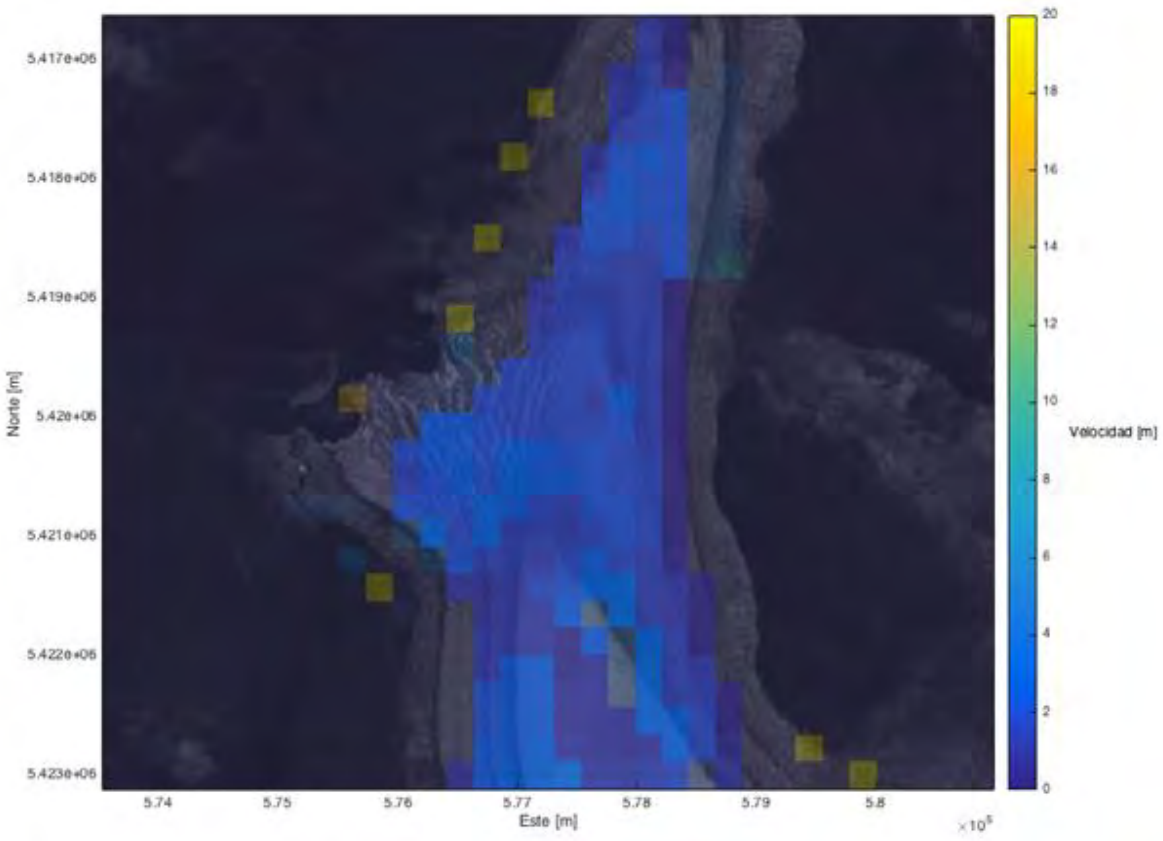


Figura 3.26 Vectores de flujo de hielo en el glaciar Témpano obtenidos con *feature tracking* entre los días 14 y 21 de enero de 2016.

Tabla 3.5 Velocidades de hielo en glaciares de fachada occidental (m/d) en años recientes.

Fecha MM/DD/AAAA	Jorge Montt	Témpano	
		W	N
03/12/2013	19	5.3	8.7
03/28/2013			
09/12/2013	13.3	-	-
09/20/2013			
11/06/2015	14.4	-	-
11/21/2015			
03/12/2016	-	3.8	6.9
04/12/2016			
07/02/2016	13.1	-	-
07/26/2016			
Promedio 2014-2016	**18**	**4**	

3.5.1.3 Flujo de calving

En la Tabla 3.6 se reportan los valores obtenidos para el periodo 2014-2016 usando imágenes satelitales y los datos medidos en terreno durante este período.

El Jorge Montt fue parametrisado con una sección parabólica considerando que se trata de un fiordo con una geometría de valle con forma de "U". Por esa razón, la profundidad indicada en la Tabla 3.6 equivale un valor propocionado entre márgenes y el centro en base un factor de "forma" [*Cuffey and Paterson*, 2010], resultando en un flujo de *calving* de 2.7 km^3/a promedio para el periodo 2014-2016 Este valor es algo superior a lo que fuera consignado para el año 2010 [*Rivera et al.*, 2012a].

En cambio, el Témpano la tasa de flujo de calving ha sido parametrizada usando una forma rectangular en base a los antecedentes batimétricos y la morfolología glaciar. Aquí se obtuvo como promedio 2014-2016 una tasa de *calving* de 0.19 km^3/a, valor significativamente menor al del Jorge Montt, pero coherente con un glaciar que no reviste el dinamismo frontal de los glaciares rápidos del CHS.

Tabla 3.6 Parámetros del flujo de *calving* para glaciares Jorge Montt y Témpano, período 2014-2016.

Parámetro	JM	T
L (m)	1500	1500
Δz (m snm)	90-200	100-330
H (m)	258	79
h (m)	90	70
LH (km^2)	0.39	0.12
θ (deg)	8	15
V_i (m/d)	18	4
ρ_i (kg/m^3)	900	900
ρ_w (kg/m^3)	1024	1024
$\frac{\partial L}{\partial t}$ (m/d)	-1.10	-0.39
g (m/s^2)	9.8	9.8
A (s/Pa^3)	2.4E-24	2.4E-24
c (km^3/a)	2.70	0.19
F (m)	35	56

3.5.2 Fachada oriental

3.5.2.1 Variaciones frontales

Los cambios de largo plazo del Glaciar O'Higgins se caracterizaron por fuertes retrocesos [*Casassa et al.*, 1997] y un colapso de la lengua terminal entre el año 1945 y 1995, con un expansión del lago O'Higgins de 41 km^2. En la Figura 3.27 se pueden apreciar que dichas fluctuaciones desde 1945 se relacionaron bien con la batimetría del lago cuya profundidad máxima alcanzó más de 800 m [*Casassa et al., 2007*].

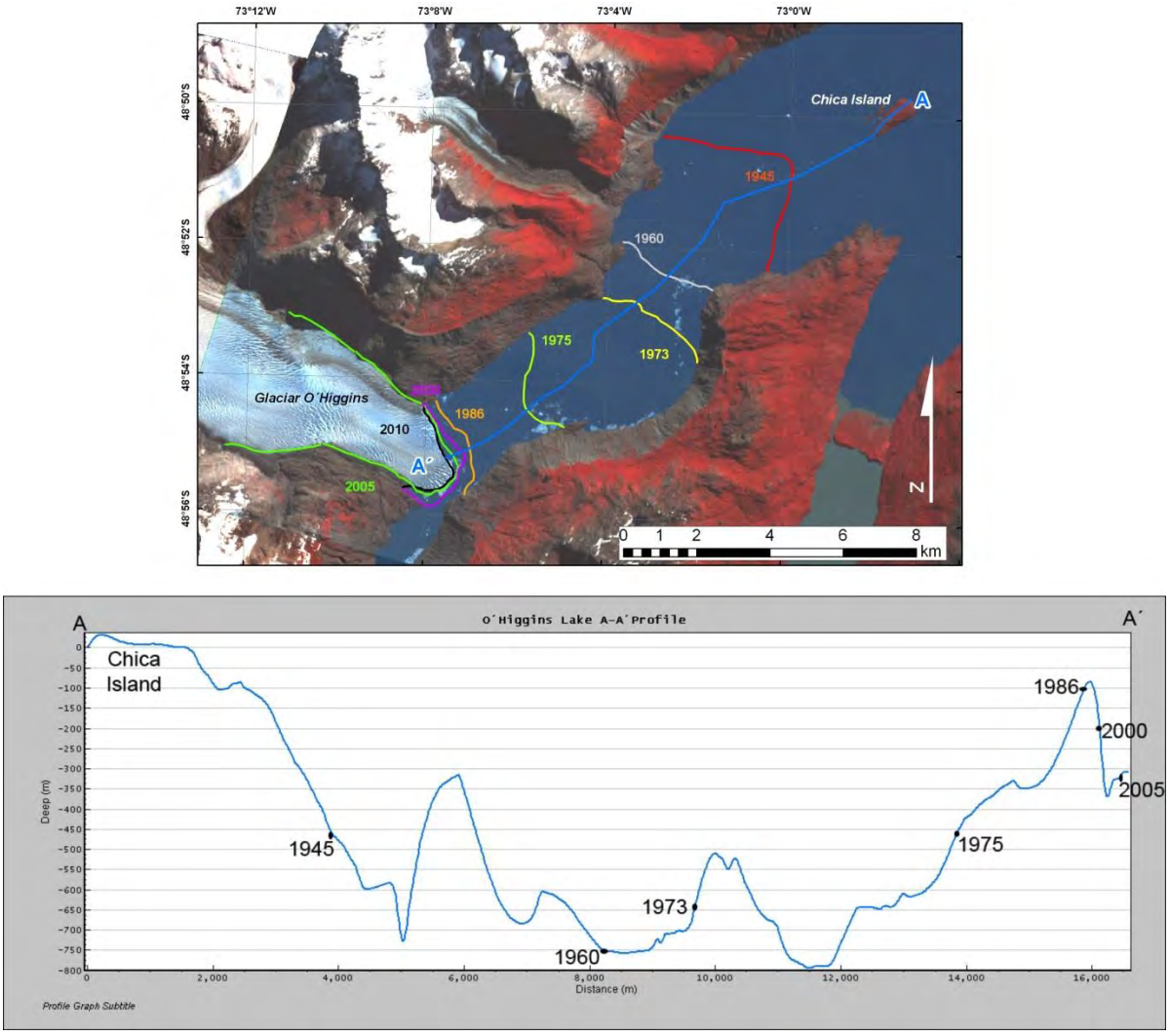


Figura 3.27 Variaciones históricas del Glaciar O'Higgins y su relación con la batimetría del lago. Fuente; Modificado de [*Casassa et al., 2007*].

Las variaciones anuales recientes del glaciar O'Higgins se indican en la Figura 3.28 y Tabla 3.7, donde se advierte una situación frontal estable en años recientes con retrocesos anuales muy cercanos al rango de imprecisión metodológica (± 2 píxeles o 30 m) y que a su vez se explican por oscilaciones intra-anuales de signo negativo y positivo. El glaciar perdió 0.3 km^2 en el período 2012-2016, hasta tener un área de 784 km^2 de hielo en el año 2016. Esta variabilidad menor se ilustra en la Figura 3.29.

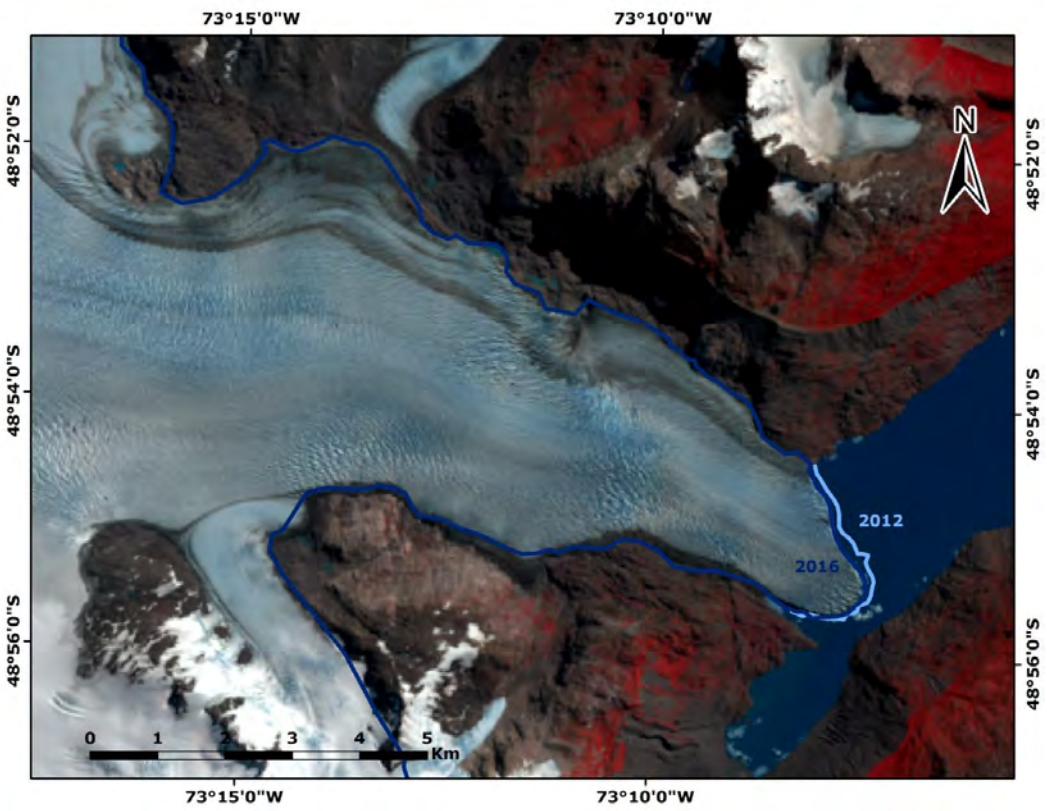


Figura 3.28 Variaciones del glaciar O'Higgins desde 2012.

Dicha estabilidad reciente se produce en un sector el lago con una sección batimétrica con profundidades del orden máximo de 450 metros.

Tabla 3.7 Variación frontal neta (m) entre fechas indicadas y tasas en períodos anuales (m/a) recientes en O'Higgins.

Fecha MM/DD/AAAA	m	m/a
03/12/2013	0	-53 (2012-2013) -38 (2013-2014) 0 (2014-2015) -56 (2015-2016) **-31 (2014-2016)***
03/28/2013	-25	
05/23/2013	-39	
09/12/2013	105	
09/20/2013	30	
05/18/2014	-112	
08/22/2014	-49	
02/11/2014	105	
01/14/2015	-35	
01/21/2015	0	
11/21/2015	-128	
11/22/2015	0	
*Este valor fue usado para el cálculo de la tasa de *calving* anual.		

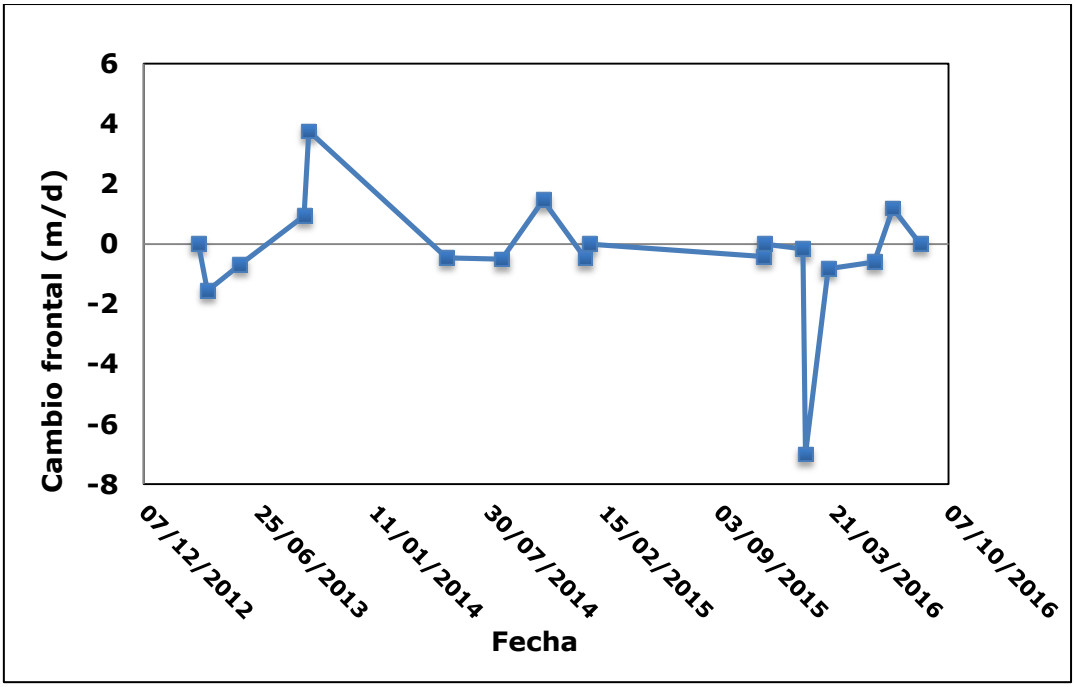


Figura 3.29 Variaciones frontales de O'Higgins expresadas en m/d.

3.5.2.2 Velocidades de hielo

Mediante el monitoreo fotogramétrico del hielo, se determinaron velocidades promedio de 8.8 ± 1.2 m/d para el glaciar O'Higgins (Figura 3.30), apreciándose flujos relativamente homogéneos en la totalidad de la zona frontal.

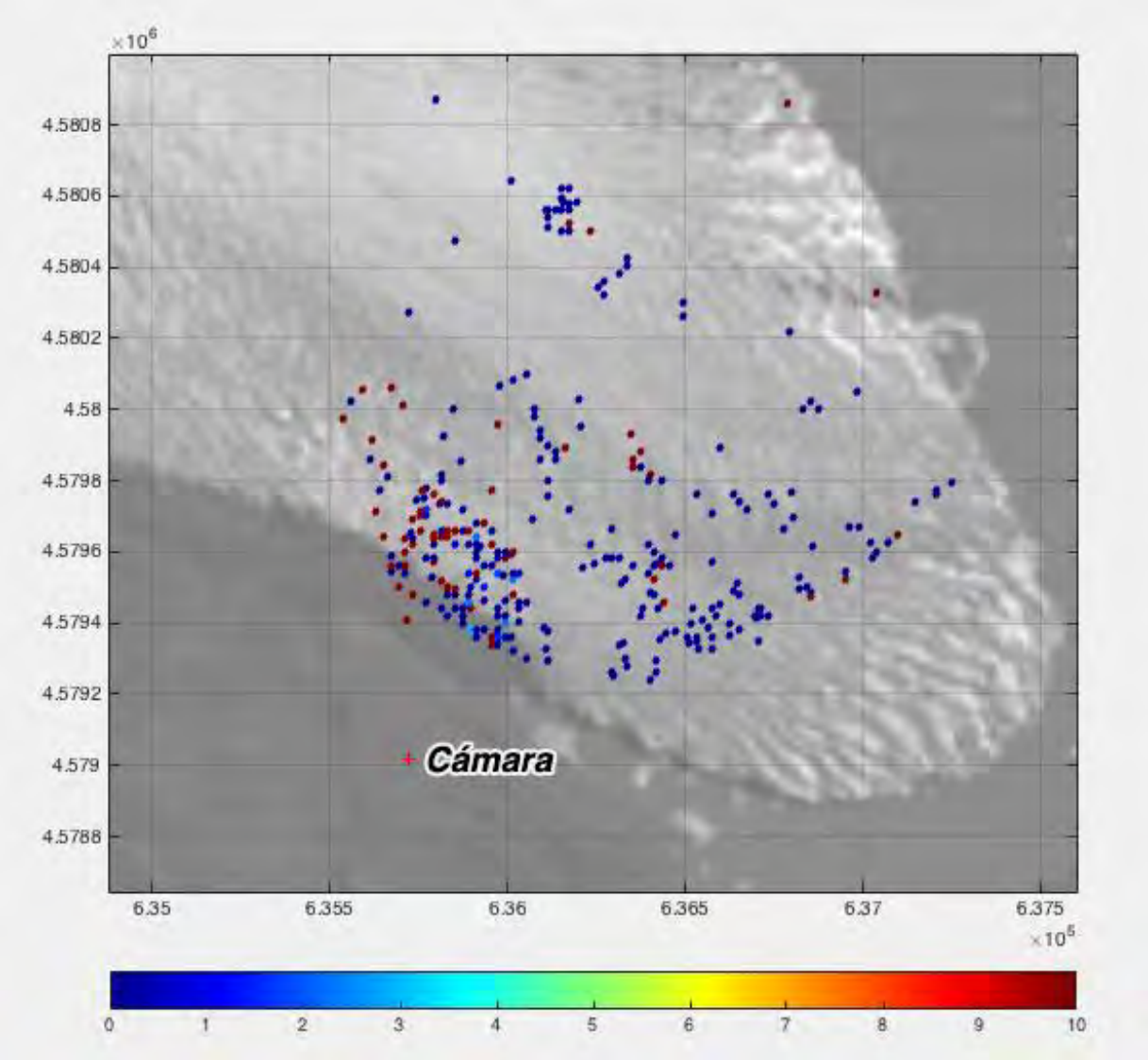


Figura 3.30 Velocidades promedio en la zona visible del Glaciar O'Higgins en m/d.

En la imagen de *feature tracking* satelital se verifica un patrón de incremento en las velocidades en dirección al frente y el centro del glaciar, con valores muy similares a los obtenidos con el registro fotográfico (Figura 3.31). A partir de este análisis también se advierte que las velocidades se incrementan significativamente al finalizar el verano (Tabla 3.8).

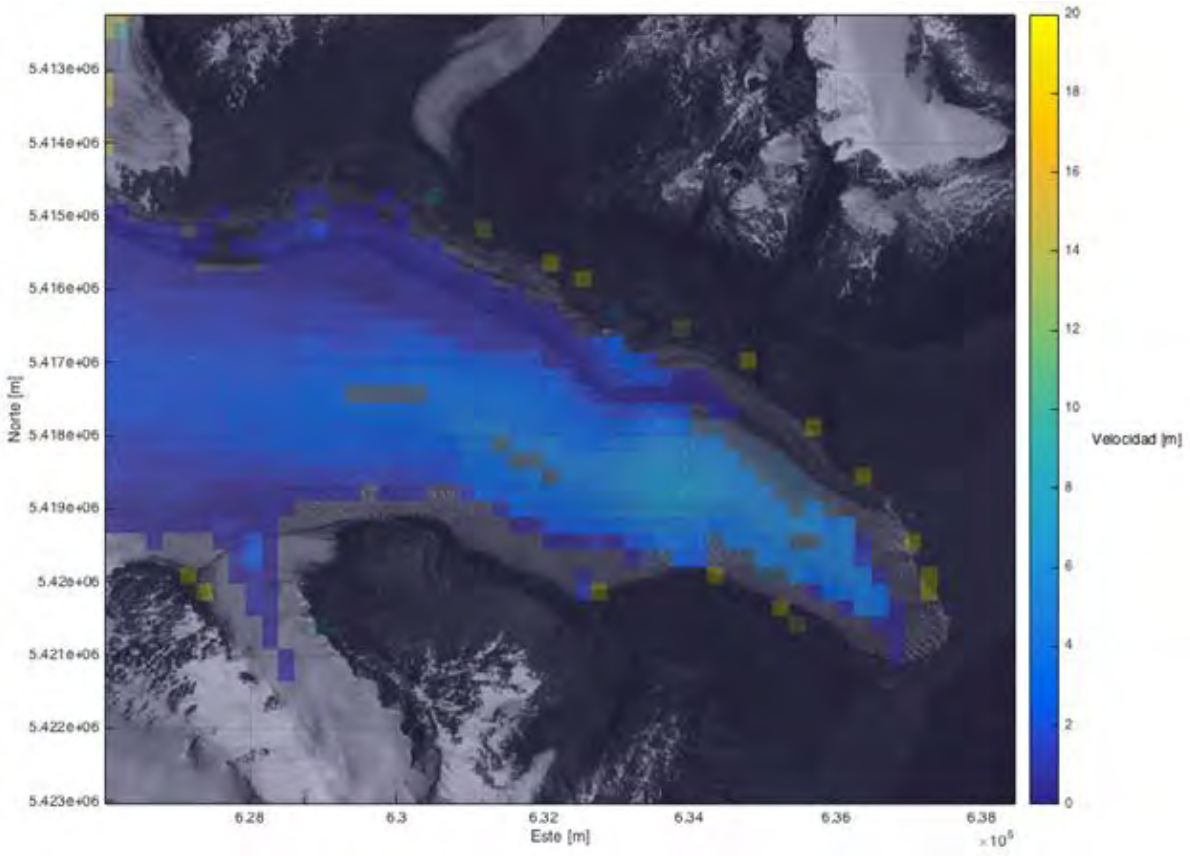


Figura 3.31 Vectores de flujo de hielo en la lengua del glaciar O'Higgins obtenidos con *feature tracking* entre los días 14 y 21 de enero de 2016.

Tabla 3.8 Velocidades de hielo en glaciar O'Higgins (m/d) en años recientes.

Fecha MM/DD/AAAA	Velocidad (m/d)
03/12/2013	10.5
03/28/2013	
09/12/2013	7.7
09/20/2013	
11/21/2015	5.3
11/22/2015	
Promedio 2014-2016	**9**

3.5.2.3 Flujo de calving

En la Tabla 3.9 se indica un flujo de *calving* de 1.5 km^3/a para el glaciar O'Higgins en el período 2014-2016. Este se ha basado en una forma parabólica considerando que es uno de los glaciares de mayor superficie en el CHS y que el desprendimiento se produce en un lago de gran profundidad. Es de suponer que la actual descarga sería menor respecto de los períodos de mayor inestabilidad en el siglo XX cuando el glaciar retrocedió en forma acelerada en aguas profundas. En el período analizado, también se estimó que el flujo de *calving* de verano es mayor al de otras epócas del año. Es así como el valor de *calving* en Marzo 2013 resultó de 2.0 km^3/a, en circunstancias que 6 meses después descendía a los 0.7 km^3/a. En noviembre de 2015, el flujo de *calving* fue de 0.9 km^3/a, señalando una variabilidad evidente relacionada con mayores flujos en el período estival.

Tabla 3.9 Parámetros del flujo de calving para el glaciar O'Higgins, período 2014-2016.

Parámetro	O'Higgins
L (m)	2300
Δz (m snm)	295-330
H (m)	304
h (m)	80
LH (km^2)	0.45
θ (deg)	10
V_i (m/d)	9
ρ_i (kg/m^3)	900
ρ_w (kg/m^3)	1000
$\frac{\partial L}{\partial t}$ (m/d)	-0.08
g (m/s^2)	9.8
A (s/Pa^3)	2.4E-24
c (km^3/a)	**1.5**
F (m)	33

3.6 Discusión y conclusiones

Se ha descrito un amplio rango de variabilidad en las dinámicas frontales, flujos y actividad de *calving* en los últimos años. Esto se debe principalmente a que las condiciones topográficas y batimétricas entre los cuerpos de hielo estudiados son muy contrastantes. Otros elementos de la geografía regional como los gradientes climáticos entre ambas fachadas del CHS y la prevalencia de fluctuaciones mareales tienen una impronta menor. Las oscilaciones de mareas son un mecanismo erosionador y generador de tensiones de gran propagación longitudinal en el hielo [*Tsutaki et al.*, 2013], sin embargo, como se verá más adelante no se logró detectar una relación fuerte entre mareas y dinámica del hielo. En

este sentido, lo más importante es la dinámica glaciar en relación a la batimetría y el *calving resultante.*

Este estudio permitió caracterizar la dinámica actual de los glaciares Jorge Montt, Témpano y O'Higgins. El uso de imágenes Aster y Landsat otorgó una resolución espacial y temporal adecuada para mapear anualmente las posiciones de los frentes terminales. En tanto que la captura de imágenes terrestres fue más limitada por las condiciones ambientales de Patagonia, las que normalmente impidieron obtener secuencias durante todo el año y de buena calidad visual. Las fotos procesadas con éxito en este proyecto no fueron suficientes para capturar la totalidad del ciclo anual, en el cual se esperan oscilaciones importantes del flujo. En su defecto, se logró monitorear los desplazamientos de hielo entre días consecutivos representativos del año donde primó la buena visibilidad y luminosidad. Estos resultados en velocidades de flujo son muy cercanos a los reportados en estudios independientes recientes (Tabla 3.10).

En el período de análisis se constata un proceso interconectado de retroceso y alto flujo en el Jorge Montt que se resume en un cambio frontal neto de ~400 m en 2014-2016 siendo acompañado por velocidades de hielo de 18 m/d en la zona de *calving* en igual período. En base a esa situación, se considera que en los últimos tres años el glaciar ha mantenido la inestabilidad y el alto dinamismo con que fue descrito en el 2010 [*Rivera et al.*, 2012a]. En el glaciar O'Higgins se ha detectado una posición frontal estable con leves retrocesos en años recientes, período en el cual se constatan velocidades altas, pero inferiores a las del Jorge Montt, y con una leve tendencia a la desaceleración [*Sakakibara and Sugiyama*, 2014]. En ambos glaciares también fue detectado que el flujo de hielo se acelera hacia fines de verano, lo que contribuye a explicar su

mayor sensibilidad a fluctuaciones de clima y alto retroceso en su historia. El glaciar Témpano por su parte, se caracteriza por un retroceso frontal desde decenas a unos pocos cientos de metros por año, con velocidades menores a las de los dos glaciares antes descritos y estables en las últimas décadas [*Sakakibara and Sugiyama*, 2014; *Mouginot and Rignot*, 2015] y eventualmente con cierto grado de desaceleración.

Tabla 3.10 Velocidades de hielo aproximadas en las zonas frontales (m/d) de los tres glaciares en estudio. Se indica período de medición entre paréntesis.

Glaciar	[*Sakakibara and Sugiyama*, 2014]	[*Mouginot and Rignot*, 2015]	[*Rivera et al.*, 2012a]	Este trabajo (2016)
Jorge Montt	4 (1984) 11 (2000) 11 (2010)	10 (2014)	13 (2010)	18 (2014-2016)
Témpano	3 (1984) 3 (2000) 3 (2010)	3 (2014)	-	4 (2014-2016)
O'Higgins	12 (1984) 11 (2000) 10 (2010)	14 (2014)	-	9 (2014-2016)

A partir de lo anterior, en el período 2014-2016 se obtuvo el máximo flujo de *calving* en el glaciar Jorge Montt con 2.7 km^3/a, en el cual se considera que hay condiciones favorables para el desprendimiento, como son la profundidad del fiordo y el forzamiento y torque que deben ejercen las mareas sobre la pared frontal del hielo, agrietándolo y favoreciendo el vaciamiento de témpanos. Ante la ausencia de fluctuaciones de nivel asociadas a mareas en el caso de un lago proglacial como lo es O'Higgins, la tasa de *calving* de 1.5 km^3/a obtenida para este glaciar se estima que

está influenciada principalmente por la profundidad de su sección batimétrica (cercana a 450 m). A diferencia de ellos, el glaciar Témpano está asentado en una geometría más confinada y somera, para el cual se obtuvo un valor de *calving* de 0.19 km^3/a. Como puede apreciarse, la descarga de hielo mediante *calving* se da en niveles altamente variables y se condice con el exceso de flotación y el dinamismo frontal exhibido por los tres glaciares (revisar estos parámetros en Tabla 3.6 y Tabla 3.9), tanto en el corto plazo como en la historia de fluctuaciones de las últimas décadas.

Lo anterior es consistente con la dinámica de la gran mayoría de los efluentes del CHS [*Rivera et al.*, 2012b; *Willis et al.*, 2012; *Muto and Furuya*, 2013; *Sakakibara and Sugiyama*, 2014; *Mouginot and Rignot*, 2015], pero se contrapone a la tendencia global del CHS donde se ha estimado un balance de masa positivo por al menos las últimas tres décadas [*Schaefer et al.*, 2015]. Una primera conclusión es que los procesos del *calving* son neurálgicos en la desestabilización y reciente evolución de dichos glaciares [*Davies and Glasser*, 2012; *Rivera et al.*, 2012a] indistintamente de producirse en un ambiente oceánico o lacustre.

El *calving* como un proceso dominante de ablación controlado en el largo plazo por la profundidad del agua [*Casassa et al.*, 1997; *Warren et al.*, 2001; *Skvarca et al.*, 2002; *Benn et al.*, 2007; *Rivera et al.*, 2012a, 2012b], a su vez puede atribuirse al ciclo *Tidewater Calving Cycle* o TWC [*Post et al.*, 2011; *Rivera et al.*, 2012b]. La fase de retroceso del TWC se caracteriza por ser repentina y caracterizarse por el colapso del hielo tal se ha conocido en glaciares australes como el Marinelli, San Rafael y sin ir más lejos, Jorge Montt [*Koppes et al.*, 2010, 2015; *Rivera et al.*, 2012b]. Jorge Montt sido altamente inestable en los últimos cinco años

caracterizados por su importante aceleración, retroceso e incluso desprendimiento de témpanos tabulares [*Rivera et al.*, 2012a]. En ese contexto, se considera que este glaciar está en el apogeo de la fase de retroceso máximo del TWC [*Post et al.*, 2011] aunque sin señales que sugieran una pronta ralentización de flujo. No así en el glaciar Témpano y O'Higgins, donde no se presentaron cambio frontales y velocidades sincrónicamente altas que sugieran condiciones de particular inestabilidad. Si bien los glaciares en contacto con fiordos se consideran más inestables que las contrapartes en agua dulce [*Haresign and Warren*, 2005; *Boyce et al.*, 2007; *Rignot et al.*, 2010, 2016; *Motyka et al.*, 2013; *Moffat*, 2014] se estima que la circulación vertical del agua en los cuerpos lacustres tiene el potencial de dinamizar fuertemente el hielo cercano al agua [*Eijpen et al.*, 2003; *Warren and Kirkbride*, 2003], lo que avala los resultados de este trabajo en relación al alto flujo que sostiene actualmente el O'Higgins. En este último, las velocidades no se acompañan por un fuerte cambio frontal, no obstante el estrés gatilllado en la interfaz agua-hielo lograría una propagación longitudinal que dinamiza el glaciar aguas arriba de la zona de *calving*.

En síntesis, el conocimiento acumulado con mediciones directas y de detalle en estos tres glaciares del CHS permite comprender los elementos más importantes de la dinámica actual del hielo, pero en lo venidero será necesario generar mayor información de los ambientes marinos y lacustres para una plena explicación de los procesos subglaciales que gobiernan la mecánica del *calving* en escala anual e intra-anual. En particular, habría que tener mejores mediciones de temperatura, y profundidad del agua en zonas cercanas a glaciares.

4 Análisis de las variaciones de la columna de agua

4.1 Resumen

Se analizaron los registros de nivel de agua obtenidos entre 2014 y 2016 mediante sensores de presión instalados en los fiordos próximos a los glaciares Jorge Montt y Témpano, y en el lago O'Higgins, en contacto con el glaciar homónimo. Se realizaron análisis espectrales transformados con funciones de Fourier, a partir de lo cual se determinaron los constituyentes mareales principales en los fiordos. Se aplicaron filtros con el objetivo de obtener la variabilidad de la columna de agua sin efectos de mareas, en base a lo cual las series de Jorge Montt y Témpano muestran oscilaciones principalmente aleatorias. La columna de agua del lago O'Higgins mostró una alta variabilidad interdiaria a lo largo del registro, donde se advirtió un incremento abrupto a fines de abril 2015. Se analizaron estas variaciones y las condiciones batimétricas para evaluar su relación con la producción de témpanos durante el período de mediciones. Se estimó que el aumento del flujo de hielo detectado a fines de verano explica la mayor actividad de *calving* cuando hay más derretimiento y se dan niveles máximos de lagos.

4.2 Introducción

En el CHS se han realizado pocos estudios sobre interacciones del océano/ lagos con la dinámica del hielo de los glaciares desprendentes asociados. Este hecho ha limitado el conocimiento sobre la evolución reciente de dichos glaciares, puesto que hay pocos datos sobre circulación de agua y de la hidrografía cercana a los glaciares, todo lo cual puede gatillar respuestas dinámicas del hielo de forma independiente a los factores climáticos. A la inversa, los efectos probables de la dinámica de *calving*

como un forzante de cambios físicos en los cuerpos de agua son prácticamente inexplorados en Patagonia.

A continuación se hace un análisis de este aspecto integrando cambios de nivel de agua con los datos batimétricos y los antecedentes de la dinámica frontal y de flujo de hielo en períodos recientes, de modo de explorar si existe una relación entre dichos cambios y la producción de témpanos desde los glaciares.

4.3 Objetivos

4.3.1 General

Describir las fluctuaciones de la columna de agua en el contexto de posibles forzantes relacionados con la descarga de hielo mediante *calving.*

4.3.2 Específicos

- Determinar espectros, variabilidad y anomalías en la altura de la columna de agua en fiordos y el lago proglacial.
- Determinar las condiciones batimétricas principales en la interfaz agua-hielo.
- Analizar posibles correlaciones entre eventos de variación del nivel del agua y desprendimiento de témpanos.

4.4 Materiales y métodos

4.4.1 Batimetría

La batimetría del fiordo donde termina Jorge Montt se midió entre los años 2010 y 2013 conjuntamente por U. de Concepción, las universidades de Washington y British Columbia en Canadá y EE.UU. respectivamente, y el CECs. Durante esta colaboración internacional se hicieron levantamientos con sistemas sonares-GPS y perfiladores acústicos que se extendieron hasta donde fue posible penetrar por vía marítima, lográndose un mapeo del fondo duro y los sedimentos a lo largo y ancho del fiordo que fue publicado en [*Moffat*, 2014]. Por otra parte, el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA) hizo un levantamiento batimétrico extensivo en el lado occidental del CHS, incluyendo la zona del glaciar Témpano. Esta información es utilizada por [*Dowdeswell, J.A. Dowdeswell*, 2014] en su estudio glacigénico de fiordos de la zona austral, donde se describen detalladamente las características de estos sistemas en términos de las profundidades y extensión de las morrenas neoglaciales sobre el piso marino. En el lago O'Higgins se dispone de la información recolectada durante la ejecución de este proyecto, así como de otras mediciones [*Casassa et al.*, 2007].

A partir de estos antecedentes, se hizo un trazado transversal en los datos más próximos a la zona del *calving,* analizando así las condiciones de mayor o menor boyantez que enfrenta el hielo al llegar al agua y que podrían favorecer el desprendimiento de témpanos en períodos donde el frente es más activo.

4.4.2 Mediciones de nivel de agua y análisis espectrales

Los sensores de presión de agua instalados en la periferia de estos glaciares próximos a las cámaras fotográficas (consultar Figura 3.22, Figura 3.25 y Figura 3.30), permitió obtener datos de oscilaciones de su nivel con frecuencia intra-horaria. El principio de funcionamiento de este tipo de sensor es la presión hidrostática ejercida por la columna de agua en el punto de medición.

Pese a algunas limitaciones y fallas técnicas que alteraron la continuidad de las series, se obtuvo un registro de gran robustez con lo que fue posible capturar el ciclo anual adecuadamente en todos los sitios de medición (Tabla 4.1).

Tabla 4.1 Período de registro de nivel de agua por estación.

Estación	Localización (lat/lon)	AAAA/MM/DD	
		Inicio	Término
Fiordo_Jorge Montt	48°13’19.4’’S/73°28’10’’W	2014/05/06	2016/06/26
Lago O’Higgins	48°55’40.08’’S/73°8’46’’W	2013/12/01 2015/04/26	2015/04/26 2016/07/01
Fiordo_Témpano	48°42’22.4’’S/73°59’01.1’’W	2015/04/27	2016/07/02

En el lago O’Higgins se produjo un vacío de datos extenso asociado al cese de mediciones del equipo que había estado operando con anterioridad al inicio de este contrato. Este se reinstaló en abril de 2015 luego de lo cual hubo capturas de datos erróneas y saltos artificiales que debieron ser filtrados y ajustados (Figura 4.1). Para extender el registro hasta

mediados de 2016 se usaron los datos de la estación DGA "Lago O'Higgins_Villa" luego de verificarse una correlación estadística del 99% entre ambos (Figura 4.2). Esto es esperable puesto que los sensores están dentro del mismo cuerpo lacustre separados por menos de 100 kilómetros y el tributario principal que llega a Villa es el brazo que es alimentado por el Glaciar O'Higgins. La mayoría de las fluctuaciones intra-anuales del sensor en el frente del glaciar están reflejadas sin desfases significativos en Villa O'Higgins.

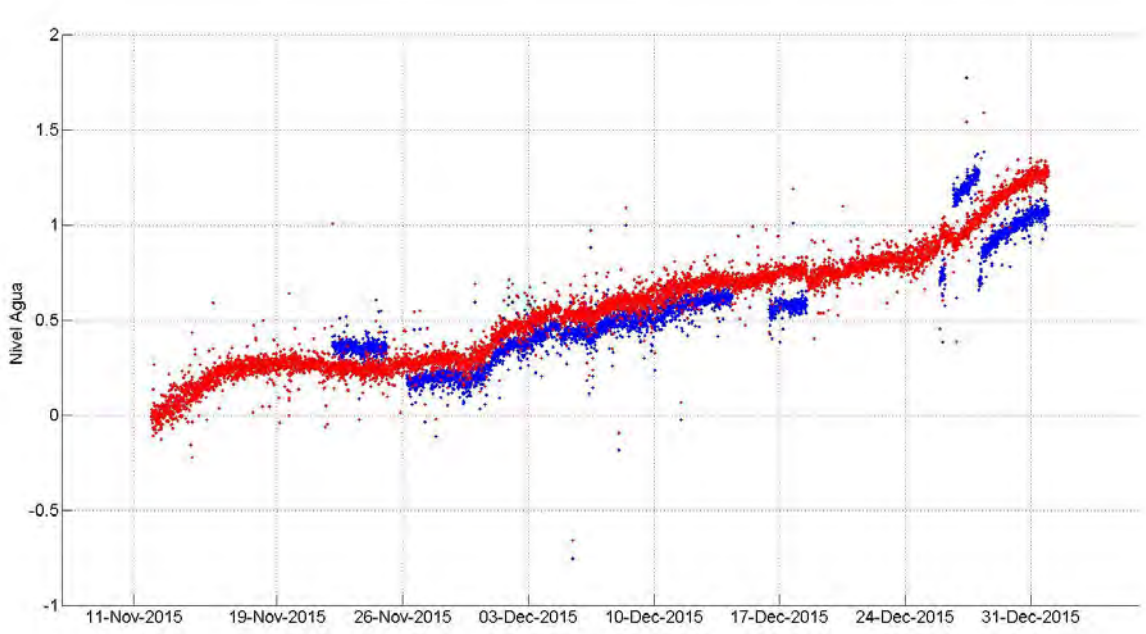


Figura 4.1 Serie de nivel de agua original del lago O'Higgins (azul) y corregida (rojo).

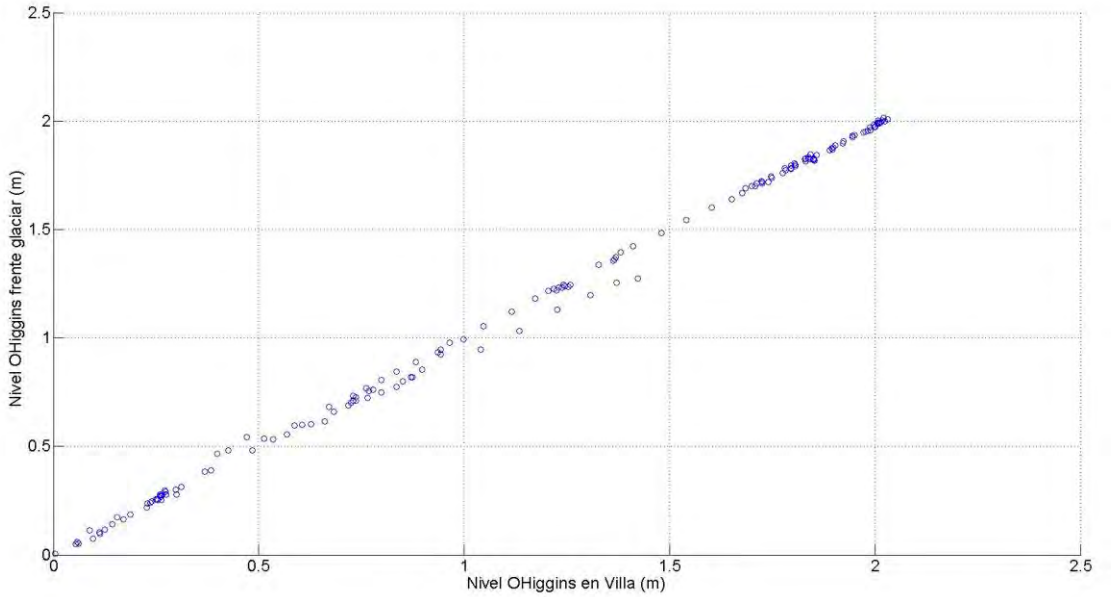


Figura 4.2 Gráfico de dispersión de datos de nivel del lago O'Higgins versus O'Higgins_Villa entre diciembre 2013 y junio 2016.

Se realizaron funciones de Fourier para determinar la existencia de ciclos o fluctuaciones importantes del nivel de la columna de agua en los fiordos y el lago proglacial. Este análisis espectral era relevante en los tres casos para explorar todos los factores que concurren en dichas oscilaciones.

Se aplicaron filtros elimina-bandas con el objetivo de obtener la variabilidad de la columna de agua removiendo efectos de mareas donde corresponda y de ese modo, analizar la importancia y variabilidad individualizada por componentes mareales y no mareales en las series.

4.5 Resultados

4.5.1 Fiordos

Los datos registrados por los sensores de presión de agua instalados en los fiordos arrojaron oscilaciones de componente sinusoidal o mareal. Pese a no cubrir el mismo rango de tiempo ya que Jorge Montt solamente logró extender su registro por más de dos años, ambos convergen en un patrón similar con una amplitud de 2.68 m (Figura 4.3 y Figura 4.4).

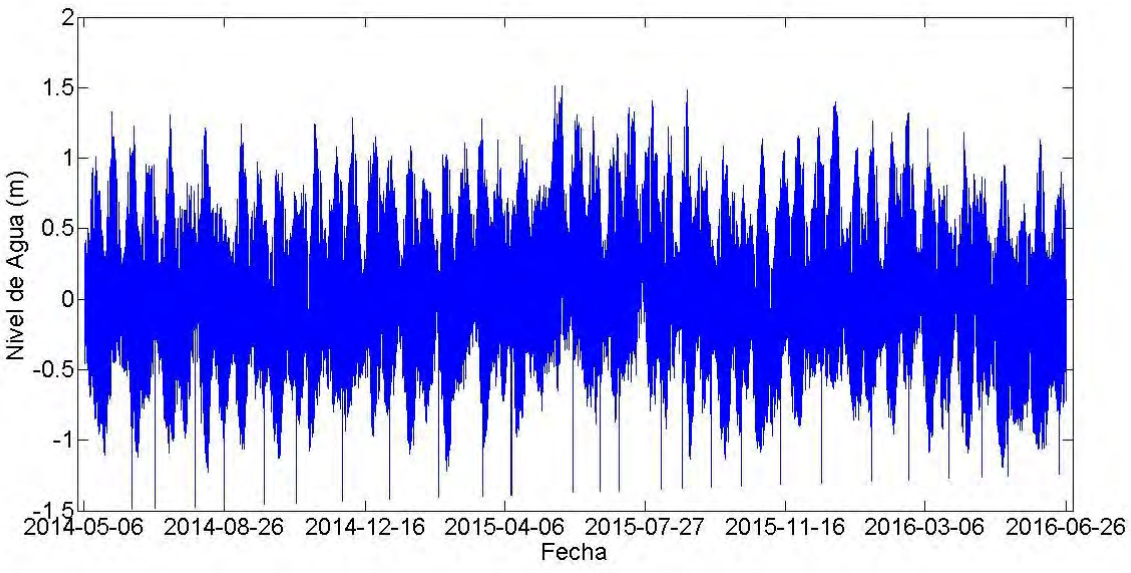


Figura 4.3 Nivel de agua del fiordo Jorge Montt.

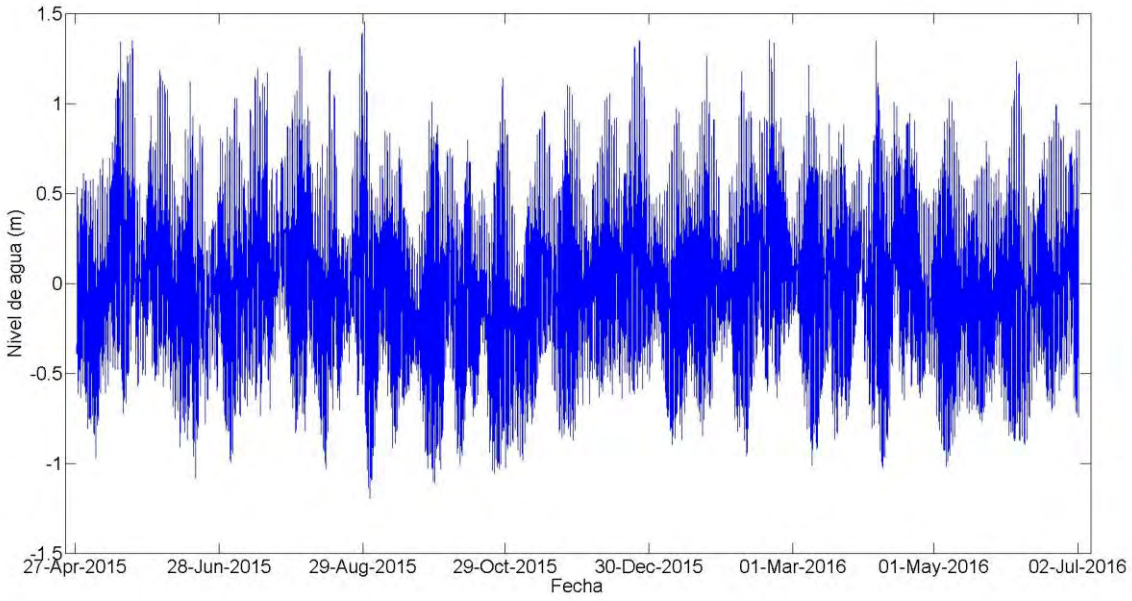


Figura 4.4 Nivel de agua del fiordo Témpano.

En los espectros de Fourier o FFT (*Fast Fourier Transform)* se identificaron los constituyentes de marea que mejor explican dichas fluctuaciones (Figura 4.5 y Figura 4.6). En ambos casos se determinó que las componentes predominantes son las semi-diurnas; en primer lugar la marea lunar (M2, período [T] 12.42 hrs entre 2 pleamares y 2 bajamares sucesivas), luego la marea solar (S2, T 12 hrs) y por último, la variación de distancia Tierra-Luna (N2, T 12.66 hrs). Los remanentes de cambios en el nivel del agua son de magnitudes de menor importancia respecto a la impronta mareal y no son detectadas en el análisis FFT debido a su aleatoriedad tal como se expone a continuación.

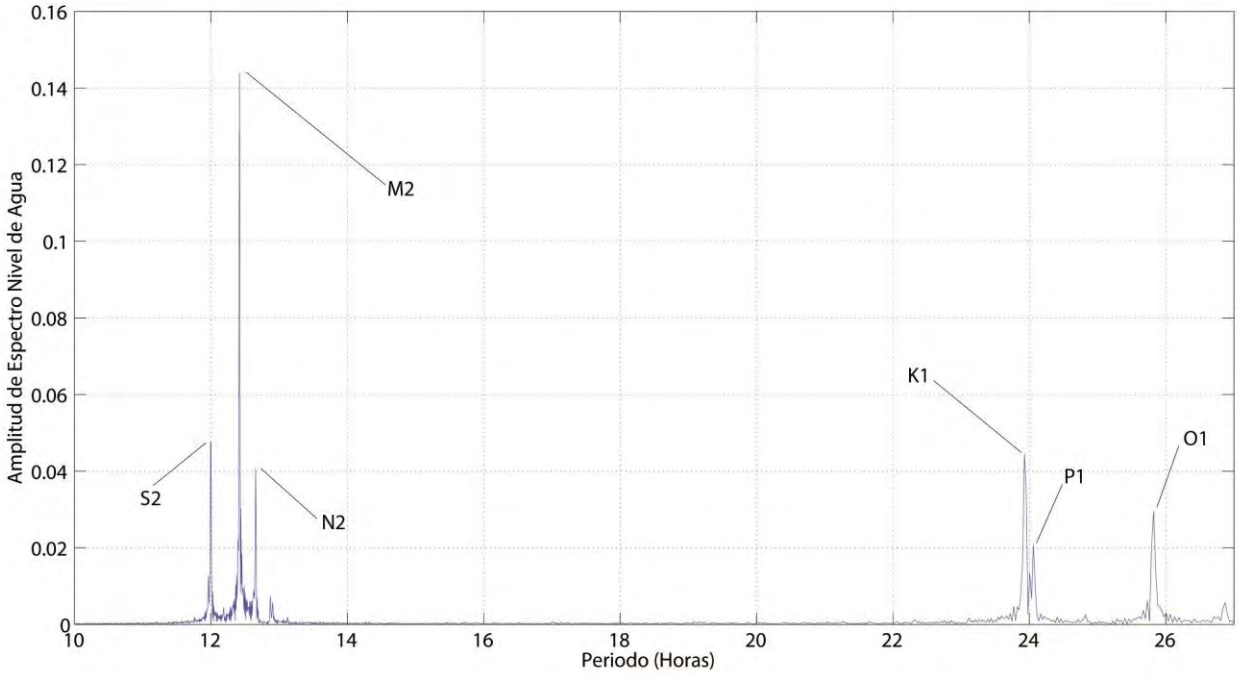


Figura 4.5 Espectros de Fourier en registros de nivel de agua del fiordo Jorge Montt.

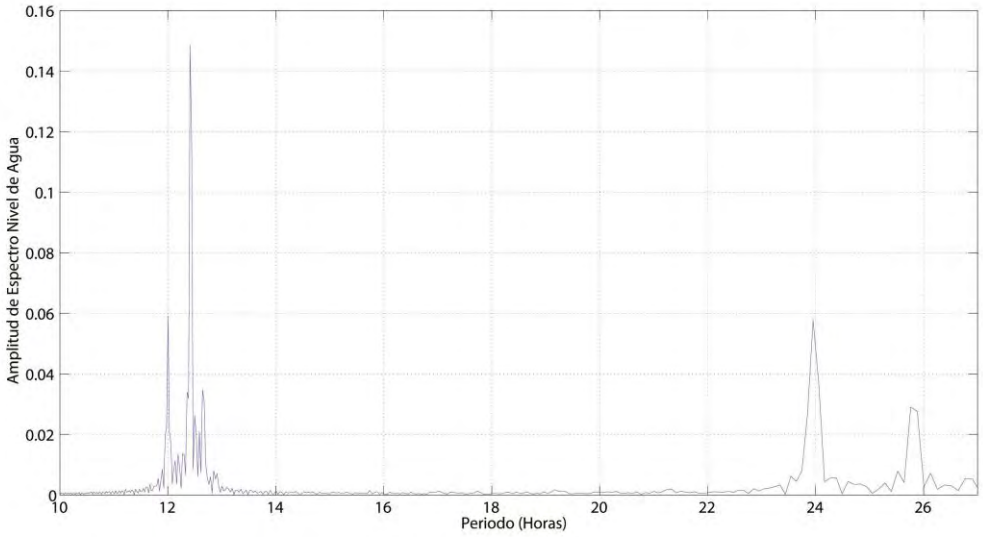


Figura 4.6 Espectros de Fourier en registros de nivel del agua del fiordo, Témpano. Verificar constituyentes de mareas en la Figura 4.5.

Para individualizar estos patrones oscilatorios se realizó un desglose de las series originales mediante la aplicación de filtros "elimina-bandas" resultando en los gráficos ilustrados en la Figura 4.8 y Figura 4.8.

Al extraer únicamente los constituyentes mareales diurnos, se advierte la persistencia de una oscilación sinusoidal de alta frecuencia asociada a la marea semidiurna (2 pleamares y dos bajares diarias), mientras que al dejar los constituyentes diurnos solares y lunares (K2, K1, O1) pero removiendo la semi-diurna, se derivó en series de menor frecuencia de onda, es decir sólo 1 pleamar y 1 bajamar que se magnifican. Ninguno de los dos por separado refleja a plenitud la serie original puesto que ambos componentes se suman, lo que de ese modo explica las sicigias (pleamares más reforzadas) que se advierten quincenalmente en la Figura 4.3 y Figura 4.4.

Cuando se filtraron conjuntamente los componentes diurnos y semi-diurnos, el registro es de carácter acíclico en la alta frecuencia, sin sesgos ni tendencias, y por tanto sugiere su relación con factores no mareales, a ser el derretimiento del hielo, la actividad de *calving* y el aporte pluviométrico. La amplitud de estos residuales es de 1.15 m en ambos casos.

La principal anomalía que se apreció en ambos fiordos es un incremento superior a los 70 cm durante unos pocos días de mayo 2015 y tras sólo algunas semanas de finalizado el año hidrológico. Durante abril del presente año llamó la atención un descenso de ~50 cm dada su cercanía con la época en que se producen los máximos de insolación y derretimiento a fines del verano, lo que se atenuó modestamente con los aumentos de nivel retomados en mayo y junio. Sin perjuicio de lo anterior, pareciera ser que el aumento de la columna de agua varias semanas después del fin del verano constituye el tiempo de respuesta a los pulsos

de derretimiento desde los glaciares y la producción de témpanos que tienden a incrementarse en esa estación.

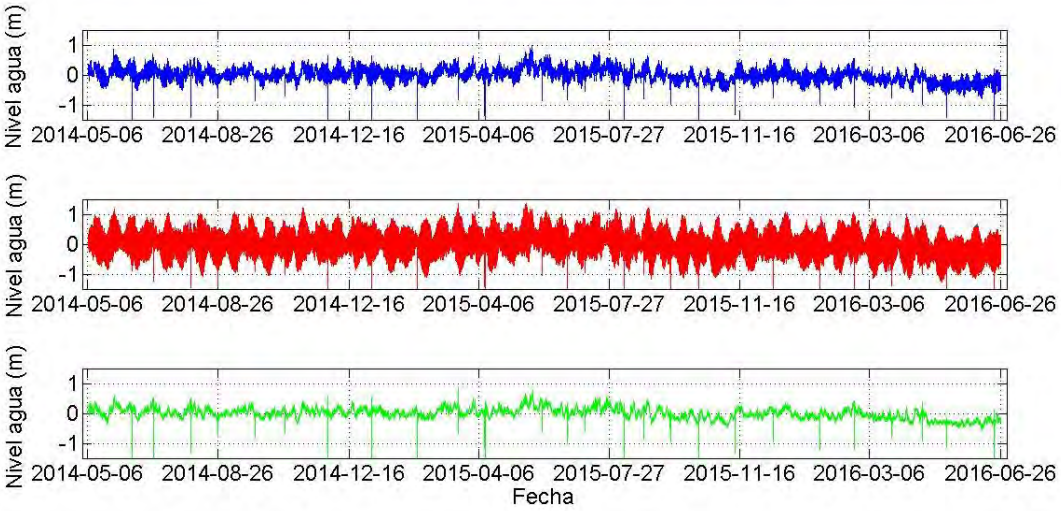


Figura 4.7 Residuales de nivel de aguas luego de remover constituyentes diurnos (sup.), semidiurnos (centro) y ambos (inf.), Jorge Montt.

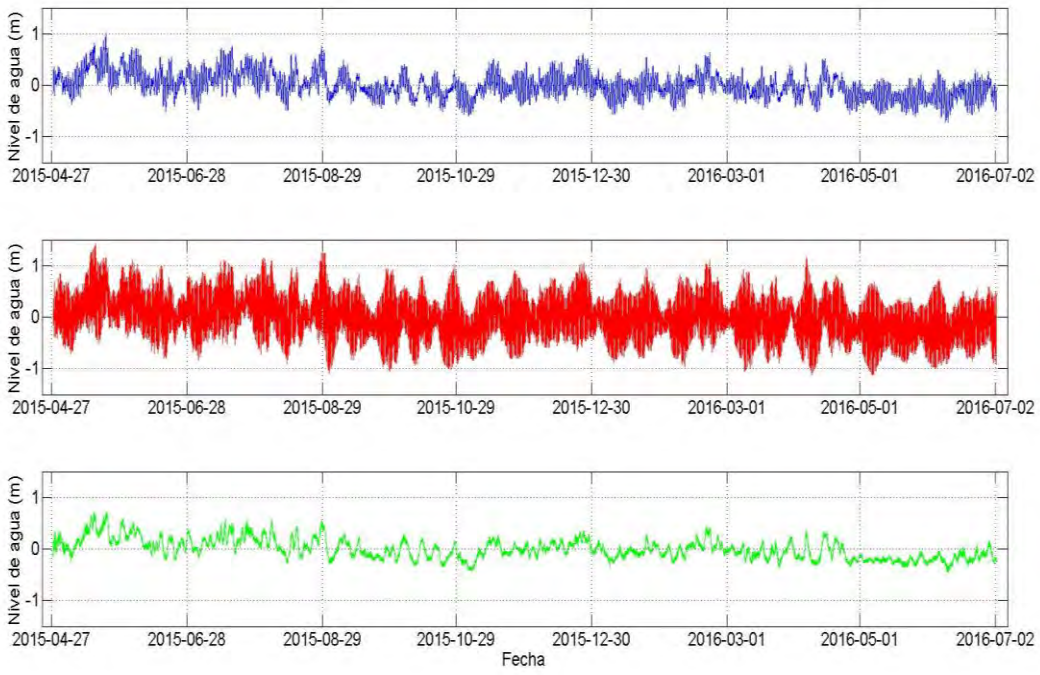


Figura 4.8 Residuales de nivel de aguas luego de remover constituyentes diurnos (sup.), semidiurnos (centro) y ambos (inf.), Témpano.

Este impacto en la columna de agua es muy razonable en el Jorge Montt puesto que a fines de verano se detectó la aceleración de flujo y el aumento en la producción de témpanos. Lo anterior lamentablemente no ha podido ser verificado con correlaciones estadísticas, principalmente por la menor frecuencia y discontinuidad de los datos de velocidades de hielo.

Adicionalmente, el glaciar enfrenta un fiordo con una sección batimétrica de gran profundidad. De acuerdo a lo reportado en [*Moffat*, 2014] en las cercanías del frente actual (~5 km), el centro de la cuenca donde termina posado Jorge Montt se profundiza hasta unos 400 metros, lo que a su vez juega un rol en desestabilizarlo y reforzar el *calving* en un período más dinámico como lo es verano. La Figura 4.9 muestra su perfil transversal oeste-este a unos 5 km del frente y donde se aprecia lo descrito.

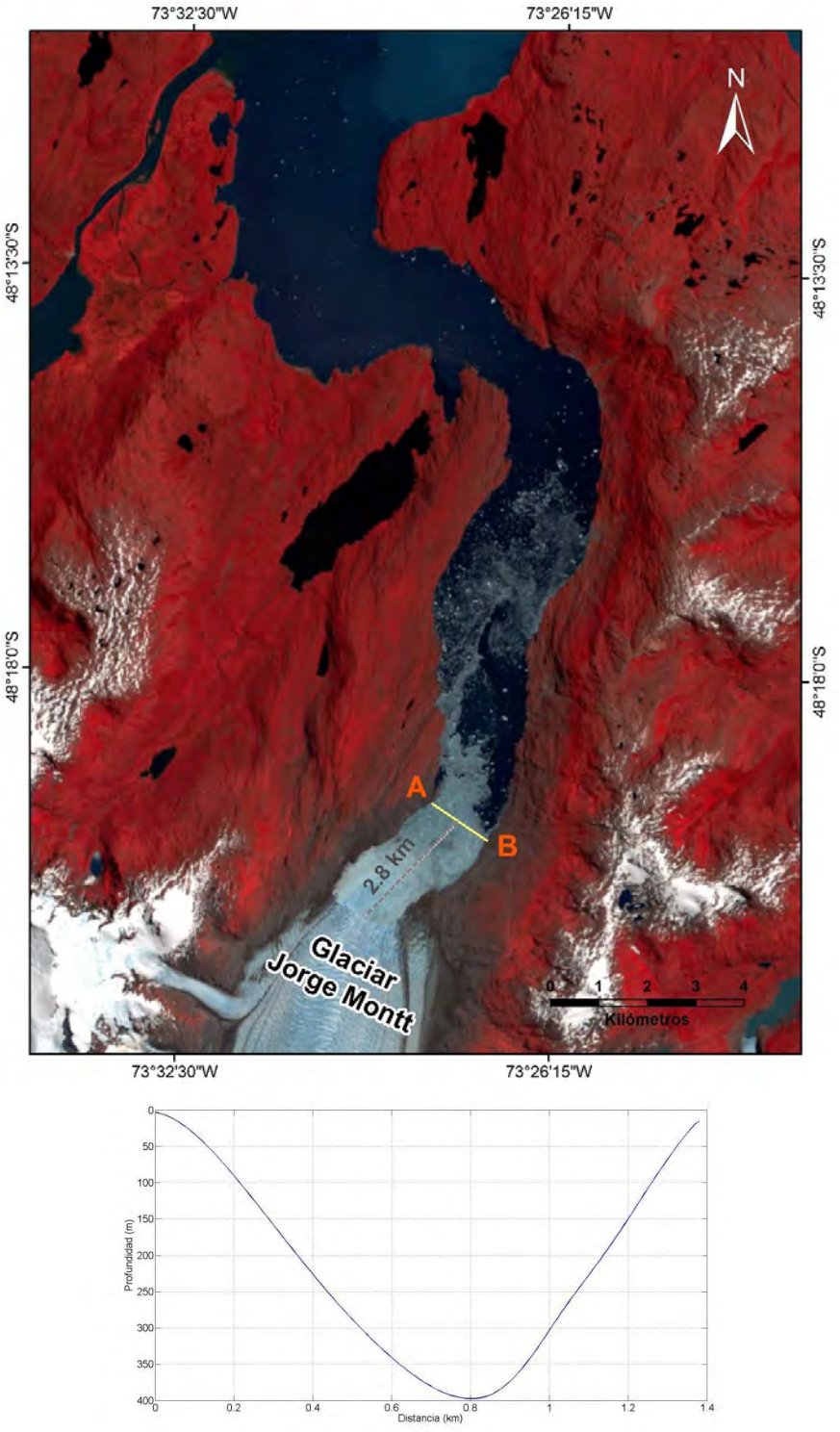


Figura 4.9 Perfil batimétrico en las proximidades del frente del glaciar Jorge Montt.

Los datos generados por el SHOA cerca de la zona de *calving* del Témpano (~1 km) consignan profundidades algo inferiores a los 100 m en el centro de la cuenca (Figura 4.10). En la margen oriental debiera ser similar pero en la margen occidental que se despegó del *pinning point* (cerca del punto "D" del perfil) es probable que la profundidad sea menor aún por los sedimentos blandos que debieran estar adosados. Por lo tanto, considerando que el fiordo es más somero y que el flujo de *calving* es menor al de Jorge Montt, la contribución a la columna de agua es más moderada.

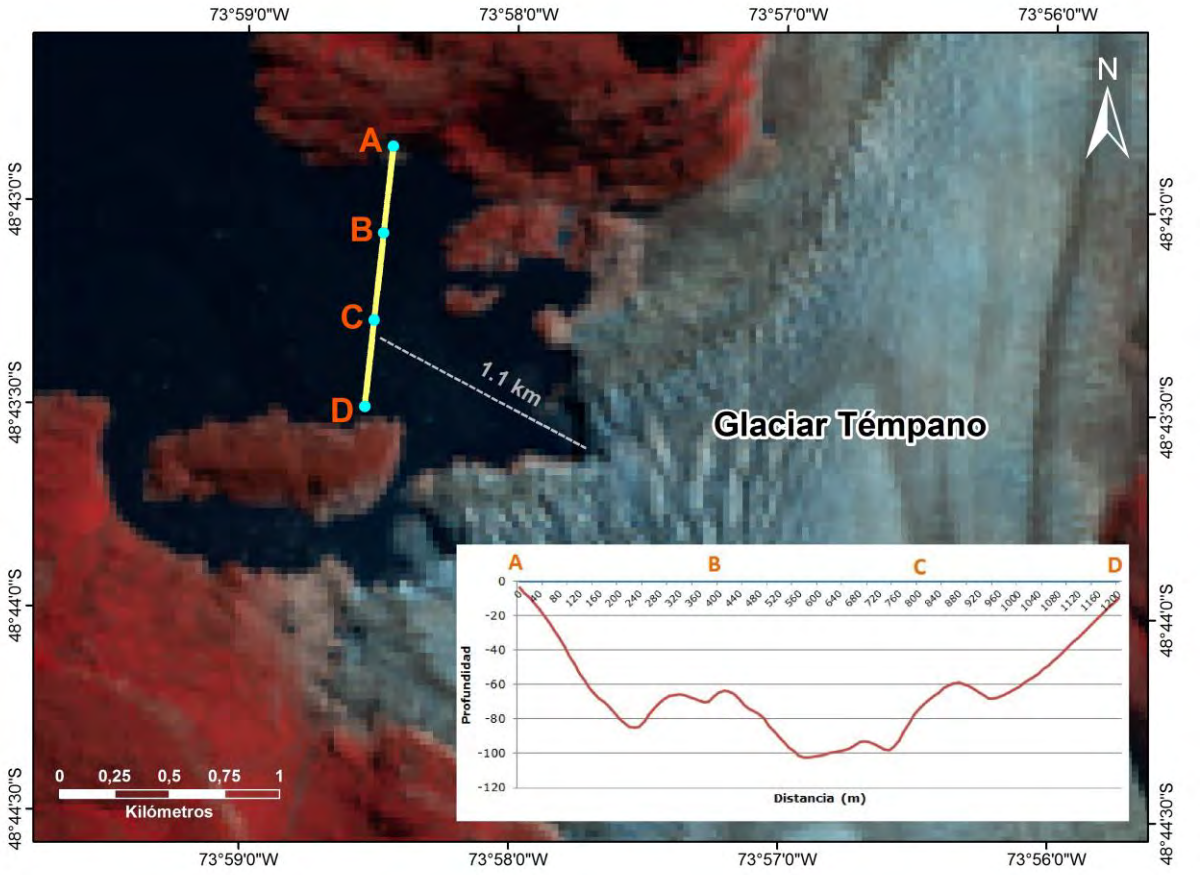


Figura 4.10 Perfil batimétrico transversal, fiordo Témpano.

4.5.2 Lago O'Higgins

Durante el primer período de operación del sensor de presión del Lago O'Higgins se habían apreciado los cambios al interior del verano. Ante la ausencia de componentes mareales e ignorando varios artefactos de datos, la gráfica advirtió el incremento sostenido del nivel de agua hasta fines de febrero 2014. Posterior a eso, se alcanzó a vislumbrar la estabilización de la capa de agua superficial (Figura 4.11)

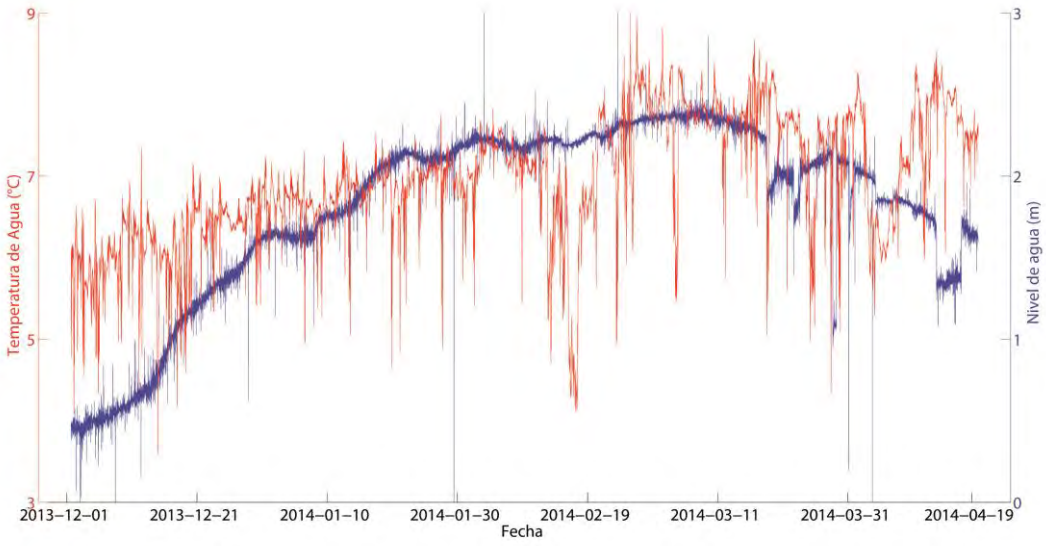


Figura 4.11 Nivel y temperatura del agua en el lago O'Higgins entre diciembre 2013 y abril 2014.

Ello puede explicar la variabilidad de ambas series -nivel y temperaturas de agua- que apartando artefactos principalmente a mitad de verano, han indicado una correlación estadísticamente significativa entre ambos ($r=0.79$, $p=0.01$, Figura 4.12).

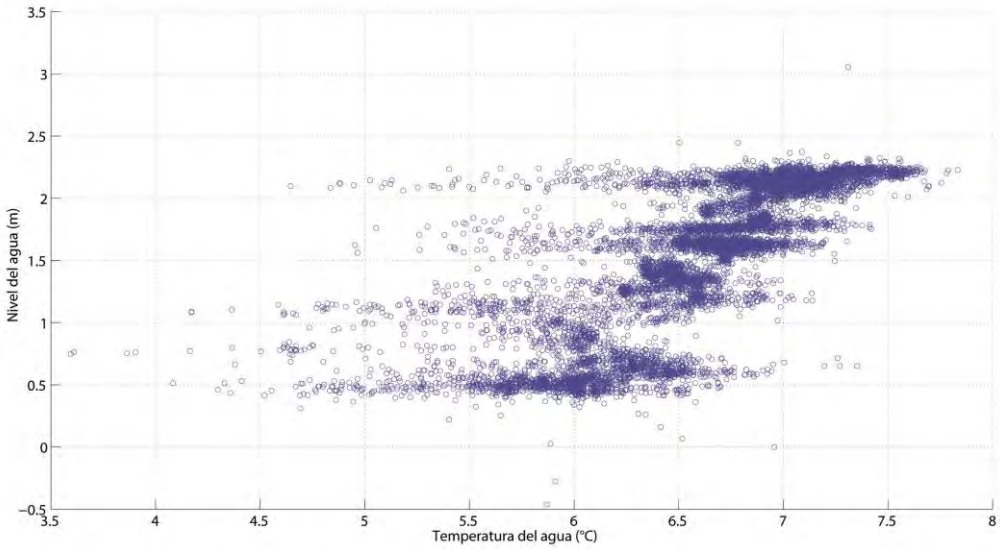


Figura 4.12 Nivel de agua versus temperatura de agua en el lago O'Higgins.

Luego de la reinstalación del sensor de presión se produjo un vacío extenso de datos por fallas del equipo eventualmente, pero en lo posterior se logró extender la serie y completarla con los datos de O'Higgins Villa hasta junio de 2016. La amplitud de estas oscilaciones en la totalidad del período es de 3.8 m, donde el máximo se produce a fines de abril 2015 y el mínimo a fines de octubre 2014 (Figura 4.13).

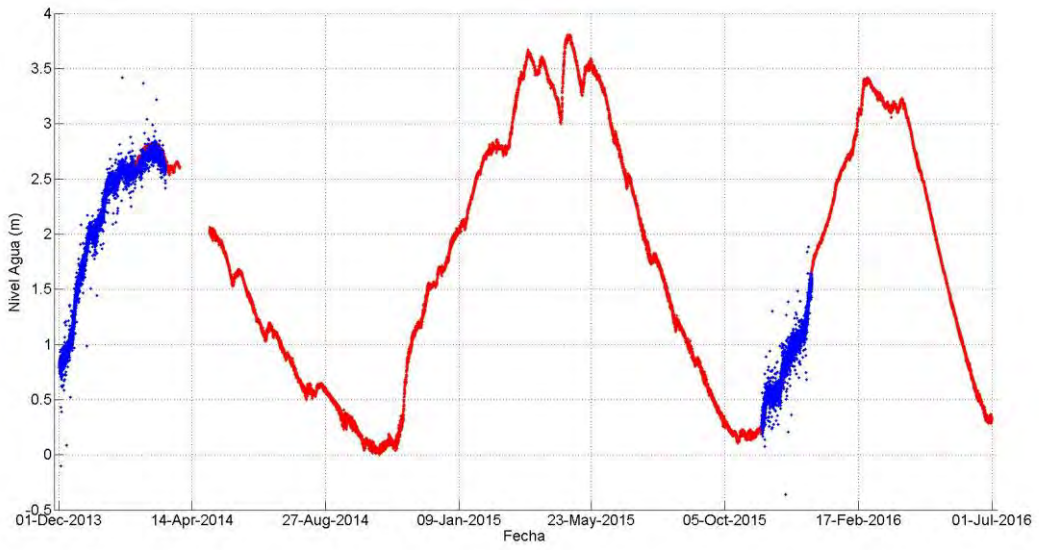


Figura 4.13 Nivel de agua en el lago O'Higgins desde diciembre 2013 hasta junio 2016.

Los períodos largos sin datos es probablemente explicado por la proximidad del frente (~100 m), donde los témpanos ya posados en el agua chocaron y atraparon el sensor lo cual impidió la captura de datos, que no era una situación del todo predecible. Se estima que por esa cercanía y la ausencia de mareas, sin embargo, este registro refleja una respuesta rápida a la dinámica de mayor flujo y *calving* que se detecta en el verano. Esta correlación no se pudo verificar con estadígrafos debido a la menor frecuencia y vacíos de los datos de velocidades. El *peak* de nivel de agua se produce pocas semanas después del fin del año hidrológico cuando se estima que las velocidades son mayores y la actividad de *calving* está en su apogeo.

Lo anterior es en gran parte explicado por el contexto lacustre de grandes profundidades que enfrenta el glaciar (Figura 4.14), ya que ante la fuerte insolación de principios-mediados de verano y los *notches* termo-erosivos

concentrados al no existir amplitudes de mareas, el glaciar agiliza la producción de témpanos y explica una respuesta más inmediata de la columna de agua lacustre.

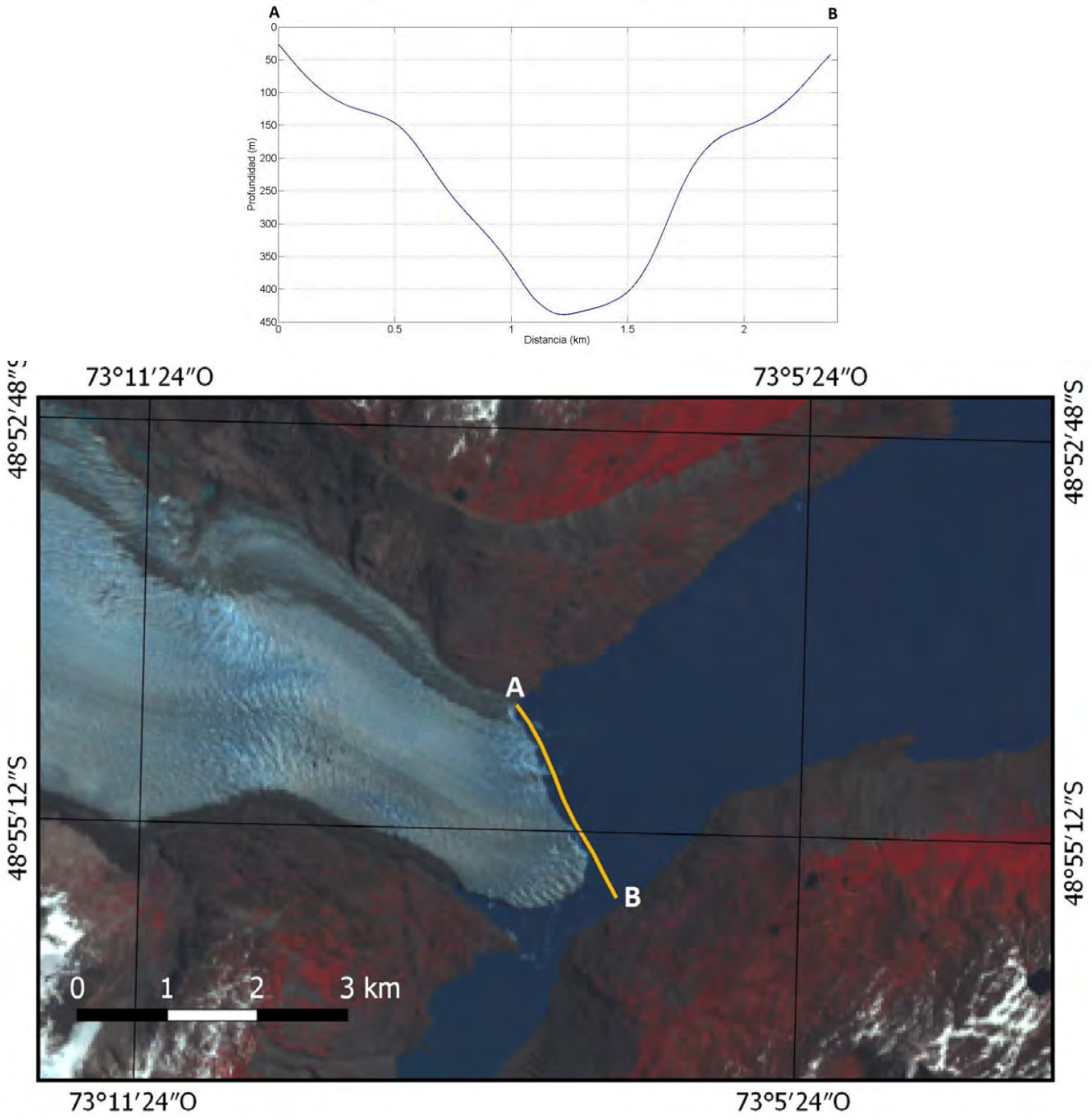


Figura 4.14 Perfil batimétrico transversal, lago O'Higgins.

4.6 Discusión y conclusiones

Se analizaron los registros de nivel de agua en los fiordos y el lago proglacial para evaluar las fluctuaciones asociadas a mareas y otras variaciones. Los fiordos están sometidos a fluctuaciones de mareas diurnas y semidiurnas que se combinan con oscilaciones aleatorias que denotaron aumentos importantes luego de finalizado el año hidrológico. El Lago O'Higgins se caracterizó por una señal no mareal, sin sesgos ni tendencias salvo el ciclo anual con aumentos de nivel del agua hasta un máximo al finalizar el verano y descensos hasta un mínimo en primavera (octubre).

Los resultados sugieren que el aporte glaciológico es relevante de considerar al menos en los dos glaciares más dinámicos, puesto que durante el verano se produce un incremento de la actividad de *calving* muy importante. Lo anterior es además reforzado en estos dos glaciares debido a las condiciones batimétricas que imponen más inestabilidad frontal. En el glaciar O'Higgins habría una respuesta más inmediata debido a la ausencia de componentes mareales.

El mayor volumen de hielo fluyendo a la zona de *calving* y generando más cantidad de *notches* térmicos en la línea de agua son los que logran gatillar desprendimientos más frecuentes. Esto probablemente hace persistir las turbulencias de aguas que explican aumentos mayores luego del período más dinámico del hielo.

5 Estudio de los cambios de elevación de los glaciares del sector norte de Campo de Hielo Sur

5.1 Resumen

Se presentan datos topográficos superficiales medidos a lo largo de perfiles longitudinales y transversales en Campo de Hielo Sur (CHS), y sus respectivos cambios de elevación en el período 1975-2015 y 2000-2015. Para la comparación de modelos topográficos superficiales, se utilizó la cartografía 1:50000 (Instituto Geográfico Militar de Chile IGM) generada a partir del registro fotogramétrico del año 1975. Para el año 2000, se empleó el modelo SRTM. Entre los resultados principales de los cambios de elevación, se detectó un adelgazamiento generalizado, cuyos valores máximos son -16.5 ± 0.5 (m/a) entre 1975-2015 y de -21.6 ± 0.7 (m/a) para los años 2000-2015.

5.2 Introducción

Los cambios temporales de la topografía superficial de un glaciar son indicadores de respuestas dinámicas del hielo al estado del balance de masa glacial que a su vez se relaciona con el clima [*Oerlemans et al.*, 1998]. Así, un glaciar estable (en equilibrio) se caracterizará por una topografía que no manifiesta grandes variaciones y su balance de masa también se mantendrá en niveles cercanos a cero año tras año, mientras que un glaciar en desequilibrio (en respuesta a cambios climático por ejemplo), se caracterizará por variaciones de elevación positivas cuando el balance es progresivamente positivo, o negativas cuando hay adelgazamiento producto de sucesivos años con balance s de masa negativos [*Jo and Schmeits*, 1998]. Al comparar dos modelos tridimensionales de terreno, los cambios detectados de elevación dan

como resultado el balance de masa de un glaciar [*Bamber and Rivera*, 2007] al asumir una densidad de hielo o nieve [*Cuffey and Paterson*, 2010]. Este es el llamado método "geodésico" [*Cox and March*, 2004], que permite determinar el balance de masa en ausencia o complementación de mediciones con el método glaciológico, que es medido en forma directa en balizas y pozos estratigráficos [*Kaser et al.*, 2003].

En este capítulo, se presentan los cambios de elevación detectados los últimos 40 años, basados en registros históricos (cartas topográficas, modelos tridimensionales satelitales) y datos *Laser Imaging Detection and Ranging* (LiDAR aerotransportado).

5.3 Objetivos

5.3.1 Objetivo general

Caracterizar la topografía superficial actual de los diferentes perfiles longitudinales y transversales en la zona norte de Campo Hielo Sur (CHS) y determinar sus cambios de elevación en las últimas décadas.

5.3.2 Objetivos específicos

- Recopilar antecedentes recientes de topografía superficial de los glaciares ubicados en CHS.
- Generar una base de datos topográfica de los glaciares a partir del año 1975 a la fecha.
- Realizar un nuevo levantamiento topográfico de los glaciares (perfiles longitudinales y transversales), mediante un sistema láser aerotransportado.
- Determinar cambios de elevación a partir de la comparación del conjunto de datos en referencia al modelo del año 1975 y SRTM del año 2000.

5.4 Materiales y métodos

5.4.1 Estudios pre-existentes

Algunos de los antecedentes de cambios de elevación registrados en el CHS en las últimas décadas se puede encontrar en Rignot *et al.* [2003], Rivera *et al.* [2012] y Willis *et al.* [2012].

5.4.2 Datos Topográficos.

Uno de los primeros modelos topográficos en CHS está basado en fotografías aéreas obtenidas en el proyecto McHurd (marzo 1975), el cual fue preparado por el Instituto Geográfico Militar de Chile (IGM) a escala 1:50,000, cuando publicó la cartografía regular para esa parte del país. Uno de los problemas asociados a este tipo de levantamiento es la nula estereoscopía de las fotografías aéreas en zonas con nieve sin elementos diferenciadores (contraste). Estos es normal sobre los ~1000 m snm en la zona de estudio, por lo que no hay curvas de nivel en la mayor parte de los sectores a mayor altura [*Rivera et al.*, 2005]. La resolución espacial del DEM (*Digital Elevation Model*) derivado de estas cartografías es 50 m y la precisión vertical de 19 m [*Rignot et al.*, 2003].

La misión Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) es un proyecto desarrollado por la NGA (*National Geospatial-Intelligence Agency)* y NASA *(National Aeronautics and Space Administration)* el cual tuvo como objetivo generar un modelo digital de terreno de la Tierra, entre las latitudes 56°S y 60°N. La misión espacial fue desarrollada en febrero del año 2000 a bordo del transbordador espacial Endeavour. El año 2003 fueron distribuidos a nivel global los datos con resolución espacial de 90 m. Finalmente, en noviembre de 2014 fueron liberados los datos de 30 m

de resolución, los que son utilizados en este trabajo. El error del modelo SRTM asciende a ±10 m en zonas con mucho relieve [*Brown et al.*, 2005]; en CHS se observó un error de 7 m en los glaciares [*Rignot et al.*, 2003]. Para la estimación del error de los cambios detectados se ocupó el valor más conservador (±10 m).

En los años 2014 y 2015 y en el ámbito del presente proyecto, el CECs realizó dos campañas aéreas, utilizando un sistema propio de escáner láser llamado CAMs (CECs Airborne Mapping System). Los componentes de este sistema y el procesamiento de los datos están descritos en las secciones 5.4.3 y 5.4.4. En estas campañas se sobrevolaron perfiles longitudinales y transversales (Figura 5.1), con el objetivo de determinar la topografía superficial de la zona de estudio. La precisión de los puntos medidos en terreno es típicamente del orden de 0.10 a 0.15m. Los antecedentes de estas campañas se describen en las secciones 5.4.5 y 5.4.6.

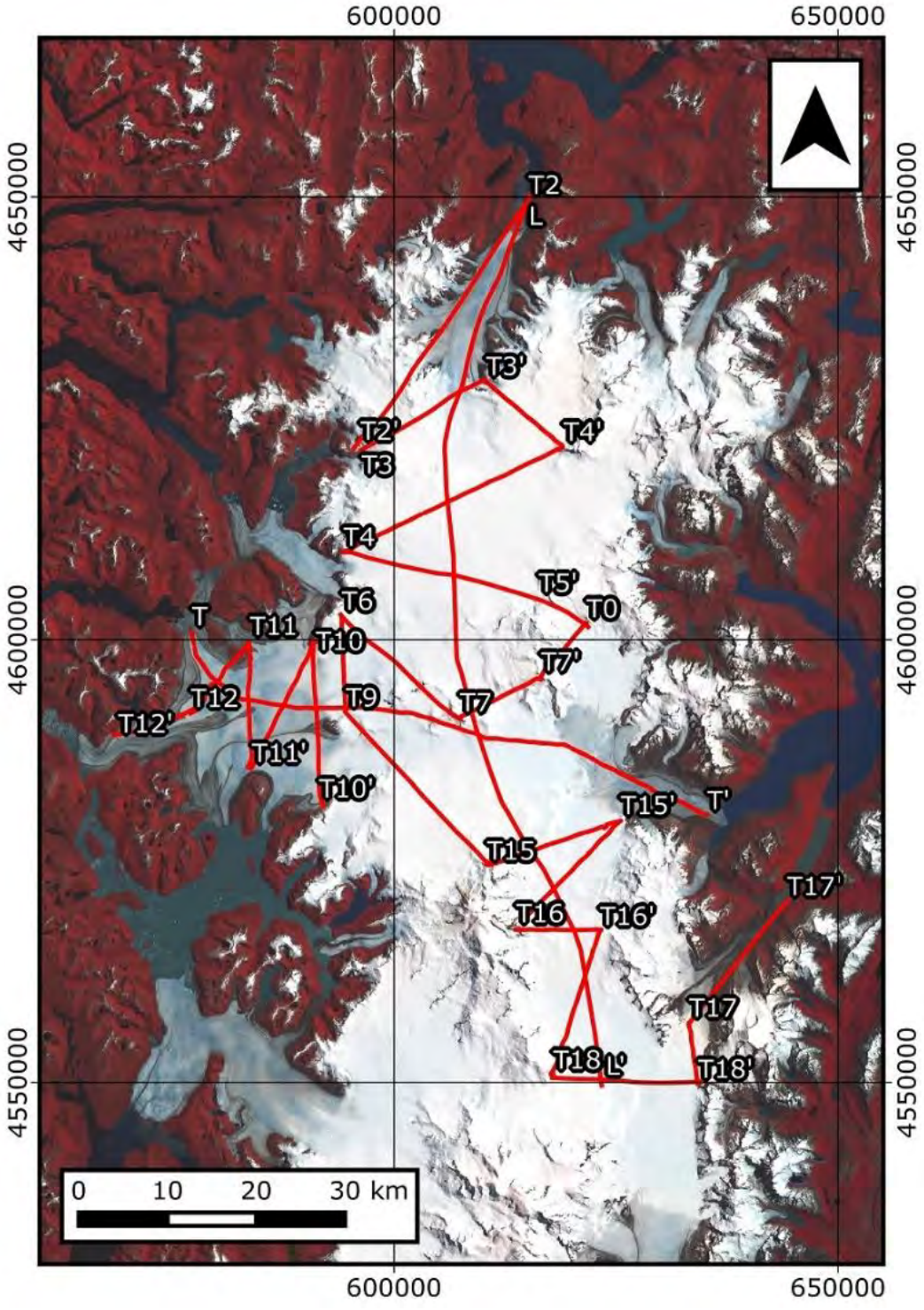


Figura 5.1 Perfiles longitudinales y transversales para el Levantamiento LiDAR para la zona norte de CHS (Imagen de fondo, Landsat8 14 de enero del 2015, proyección UTM, Zona 18S, Datum WGS84).

5.4.3 Componentes y operación del sistema aerotransportado LiDAR – CAMs

Las campañas aéreas han empleado un sistema láser integrado de tipo aerotransportado diseñado por el Laboratorio de Glaciología del CECs, que emite un haz de luz que se refleja en la superficie y es recibido en el receptor. De esta forma se cuantifica el tiempo de viaje de la señal desde su emisión, obteniendo la distancia que existe entre la aeronave y el terreno. Para saber la altura del emisor y referenciarlo respecto del nivel del mar (o respecto del elipsoide de referencia), se utiliza un GPS geodésico de doble frecuencia, con el cual se puede lograr una precisión centimétrica (una base en roca y un receptor en el avión). Adicionalmente, para corregir la actitud de la aeronave y orientar las mediciones láser, con respecto a su posición en el espacio, se utiliza una plataforma inercial que registra el movimiento del helicóptero o aeronave en sus tres ejes (cabeceo, guiñada, alabeo).

Los sensores y sus principales características de la medición con el sistema CAMS son:

Barredor láser de espejos marca RIEGL, modelo LMS-Q240, con una tasa real de repetición de pulsos de 10 KHz, longitud de onda 904 nm (infrarrojo cercano), considerado adecuado para monitorear superficies de hielo y nieve [*Pellikka and Rees*, 2010], altura de vuelo hasta 450 m sobre el terreno, ancho máximo de barrido de 450 m y precisión de las mediciones de ±20 mm.

Sistema de Mediciones Inerciales marca iMAR, modelo iNAV-FMS-Airsurv, con medición de ángulos de alabeo (roll), cabeceo (pitch) y guiñada (yaw), y las aceleraciones instantáneas en los tres ejes espaciales (x,y,z). Tasa de muestreo de 400 Hz, con una

precisión de los ángulos de ~0.75°/hora que corresponde a una constante. Precisión típica de la trayectoria luego del post proceso de 7 a 20 cm dependiendo de la distancia de la línea base entre la estación GPS en tierra y la aeronave.

Receptores GPS de doble frecuencia marca JAVAD, modelo Lexon LGGD (tasa de captura de datos hasta 10 Hz y memoria de 512 MByte), en operación simultánea de estación base en terreno. Una opera como base para facilitar la alineación al inicio y al final del vuelo, y una segunda estación más cerca del área de estudio.

5.4.4 Post-procesamiento de datos

El procesamiento de los datos obtenidos durante los vuelos de medición se realizó en 3 pasos:

Se utilizó el *software* Inertial Explorer de la empresa canadiense Novatel con el que se analizan y procesan los datos GPS cinemáticos junto con los datos inerciales. Los datos GPS son procesados con el módulo GrafNav, el que permite realizar este procedimiento mediante una técnica cinemática en forma diferencial con una o más estaciones de referencia ponderando las bases según su distancia a la antena móvil. Se usa la combinación lineal *ionospheric free* de las dos frecuencias permitiendo corregir el efecto de la refracción ionosférica. Como efemérides se utilizan las órbitas precisas del International GNSS Service (http://igscb.jpl.nasa.gov/). Los datos inerciales son procesados con el módulo GPS-IMU disponible en el mismo *software*, empleando la técnica mediante el filtro KALMAN. Para la alineación de la IMU, con el fin de inicializar los ángulos de actitud idealmente

se usa un período mínimo de 2 minutos durante el cual la aeronave está completamente detenida.

Definidas las trayectorias finales del vuelo (GPS e IMU), estos son utilizados para georeferenciar las mediciones del barredor láser, siendo el producto resultante una nube de puntos relativa al sistema de referencia terrestre WGS-84 mediante un *software* desarrollado por el Laboratorio de Glaciología del CECs, denominado "LMS_GEOREF".

El post-proceso de la nube de puntos es desarrollado mediante el software *TerraSuite (TerraScan, TerraMatch y TerraModel)* de la empresa *Terrasolid* (Finlandia) que permite la clasificación y calibración de los datos láser, y la generación de Modelos Digitales de Elevación (DEMS). El objetivo principal de la clasificación, es detectar y eliminar puntos erráticos que normalmente no superan 0.1 por mil del conjunto total de datos. Los datos ya filtrados y que son obtenidos en zonas con superficies bien definidas (una zona edificada o de topografía sin vegetación), se usa para la calibración del sistema con el fin de determinar la geometría exacta entre los componentes escáner láser y la IMU.

A partir de marzo de 2015, el software *TerraSuite* ha actualizado la metodología para el proceso de calibración, permitiendo mejorar variaciones generadas entre líneas de vuelo (Figura 5.2), además se reduce el tiempo empleado en este proceso. Esta herramienta, denominada "*Tie Lines*" permite determinar líneas presentes en la nube de puntos que están referidas a una misma zona o elemento del terreno (suelo, techos, edificaciones, etc.). Con estas observaciones el *software*

determina la mejor solución para los parámetros de *Roll, Pitch, Heading* y además el error de escala.

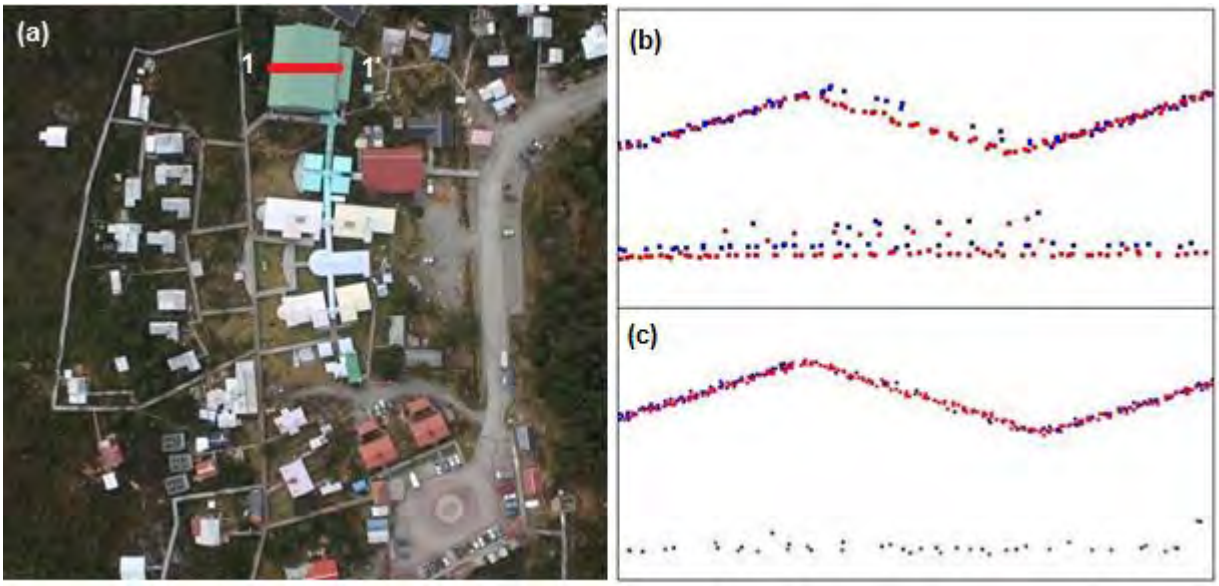


Figura 5.2 (a) Perfil vertical zona de calibración (techumbres), (b) datos *RAW* sin calibración, (c) datos calibrados aplicando metodología "*Tie Lines*".

Los parámetros adecuados para una calibración óptima, considerando las características del terreno, equipos y condiciones bajo las cuales se han realizado los levantamientos, han sido definidos como se detalla a continuación:

- Error máximo xy = ±1.5 m
- Error máximo z = ± 1.5 m
- Tolerancia máxima del ajuste = ±0.10 m
- Espaciado entre *Tie Lines* = 5 m
- Distancia mínima de *Tie Line*: 7 m
- Error angular máximo = 1º Sexagesimal
- Profundidad máxima *Tie Line*: 1.5 m

El parámetro que permite evaluar la precisión de los datos en este *software*, es la magnitud media (MAG) de las diferencias de altura en metros entre líneas de vuelo traslapadas, ecuación (5.1).

$$\mathrm{MAG} = \frac{\sum_{i=1}^{n} |x_{1,i} - x_{2,i}|}{n} \qquad \textbf{(5.1)}$$

Donde $x_{1,i}$ y $x_{2,i}$ son las alturas de las dos superficies, las que han sido obtenidas en trayectorias de vuelo independientes (1 y 2 en este caso) en puntos idénticos, siendo n el número de puntos usados en el cálculo.

Las correcciones así determinadas se aplican a todo el conjunto de datos. El error de los puntos de un vuelo es normalmente de unos 0.5 m.

Esta nube de puntos filtrados y calibrados sirve como base para la aplicación de un método de interpolación, para lo cual después de varias pruebas, se seleccionó gracias a los menores errores, el de triangulación de los datos mediante una red de triángulos irregulares (*Triangulated Irregular Network*, TIN), la cual se exporta como una grilla de 5 m de resolución (eventualmente se transforma a grillas de otras dimensiones cuando así lo requiere la comparación, por ejemplo, con datos SRTM de píxeles de 30 m). Estos DEMs representan la superficie del glaciar y su entorno en el momento de la toma de los datos y puede ser comparado con registros de otras épocas.

5.4.5 Campaña de agosto de 2014

El día jueves 21 de agosto, se llevó a cabo la recepción de los equipos en el aeródromo de Caleta Tortel, punto de operación base para la campaña aérea. El día 22 de agosto, comenzó la instalación y pruebas en tierra del sistema, donde a través de un protocolo se chequeó la interacción entre los equipos y la calidad de los datos estacionarios almacenados en la computadora de control. En el trabajo de instalación de la plataforma *DART Heli-utility Pod* (Figura 5.3) participó personal CECs y personal técnico experto en operaciones aerotransportadas, permitiendo operar de acuerdo a los estándares que la regulación aeronáutica nacional e internacional que se exige.



Figura 5.3 Montaje del sistema CAMS en *Heli-utility Pod*, helicóptero *AS350-B3*.

Posteriormente, se procedió a realizar un vuelo de calibración. Para ello, se sobrevoló la zona superior de caleta Tortel (Figura 5.4). Dicha área cuenta con las características necesarias para efectuar el ajuste de las distintas

líneas de vuelos, de modo de contrastar las diferencias angulares; y así determinar los valores más precisos de cabeceo, guiñada y alabeo, útiles para el ajuste de la nube de puntos (X,Y,Z) medidos.



Figura 5.4 Imagen capturada desde una cámara Canon EOS 7D durante la calibración del sistema. Caleta Tortel.

Paralelamente en tierra, se definieron una serie de puntos en terreno (Tabla 5.1), además de una estación base denominada ATRL, ubicado a un costado del aeródromo. Este punto fue vinculado desde el vértice CCRN, perteneciente a la red SIRGAS (equivalente a WGS-84) con el modo diferencial GPS (DGPS) *[Seeber, 1993]*.

SIRGAS adopta el elipsoide GRS80 para definir las coordenadas geodésicas (latitud, longitud y altura elipsoidal) y sus correspondientes proyectadas

UTM (Este, Norte). Respecto al *datum* vertical, con el objetivo de lograr una mejor representatividad de la información altimétrica GPS para todas las estaciones, se consideraron ondulaciones geoidales del modelo global "*Earth Gravity Mode*" EGM96.

Tabla 5.1 Coordenadas UTM y elevación, vértice Sirgas CCRN, estación base y PRs. Huso 18S, sistema de referencia SIRGAS, basado en modelo geoidal EGM08.

Nombre estación	Este (m)	Norte (m)	Elevación msnm (m)	Elevación Elipsoidal (m)
CCRN	683511.97	4764194.40	174.68	191.89
ATRL	610229.89	4706508.34	2.44	18.88
JM01	610570.56	4644835.24	425.98	441.46
OHGS	635694.42	4578935.34	393.88	410.57
TMPN	576086.82	4600377.53	448.52	463.33

La cobertura y el detalle de cada línea de vuelo se definen a continuación en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2 Detalle por día de trabajo, perfiles sobrevolados en la zona. Distancia lineal (km)

Fecha	Perfil	km
24-08-2014	T2-T2'	34
	T3-T3'	16
	T9-T9'	25
	T11-T11'	14
	T15-T15'	23
	T16-T16'	10
Total		**121**
26-08-2014	L-L'	106
	T-T'	66
	T4-T4'	29
	T6-T6'	18
	T10-T10'	19
	T12-T12'	10
	T17-T17'	18
	T18-T18'	17
Total		**281**
27-08-2014	T5-T5'	26
	T5-0	3
	T0-T7	8
	T7-T7'	15
Total		**52**

Con un total de ~3 días de operación sin incluir traslado a la zona de estudio, se realizaron 18 líneas de medición con un total de 454 km medidos.

5.4.6 Datos obtenidos durante el año 2015

Durante 2015 se realizó una campaña topográfica que tuvo como objetivo la realización de ~150 km lineales. Del mismo modo que el año anterior, se optó en utilizar un Eurocopter AS350-B3 Ecureuil. La campaña tuvo como inicio el día viernes 02 de octubre de 2015, siendo el aeródromo de Villa O'Higgins la base operativa, donde se ejecutaron las labores de montaje (DART Heli-utility Pod) y pruebas en tierra del sistema CAMs.

Como apoyo geodésico, se estableció una estación de referencia GPS (*Global Positioning System*) denominada VLLA (Tabla 5.3), ubicada a un costado del aeródromo Villa O'Higgins. Los datos GPS fueron procesados independientemente en modo PPP (*Precise Point Positioning*) *[Zumberge et al., 1997]* con el software GrafNav 8.3 de la empresa *Novatel*, empleando órbitas precisas entregadas por el *Center for Orbit Determination in Europe*, con una resolución temporal de 15 minutos para las posiciones y 5 segundos para los parámetros de los relojes satelitales (*datum* de referencia WGS-84). La función principal de esta estación de referencia es corregir los errores asociados a la señales de satélites en equipos móviles, tanto en observaciones estáticas (puntos de control) como cinemáticas (vuelos), a través del modo diferencial GPS (DGPS) *[Seeber, 1993].*

Tabla 5.3 Coordenadas UTM y elevación, vértice VLLA, estación base. Huso 18S, sistema de referencia WGS-84, basado en modelo geoidal EGM08.

Nombre estación	Este (m)	Norte (m)	Elevación msnm	Elevación Elipsoidal (m)
VLLA	680188.49	4629060.79	266.29	282.50

El vuelo de calibración (Figura 5.5) se efectuó el mismo día de la instalación, no observándose problemas de captura de datos (GPS, IMU, LiDAR y fotografías aéreas). Una vez realizada la calibración, se definieron

los parámetros en la orientación de las líneas de vuelo, revelando errores máximos de ±0.15 m. En consecuencia se asigna una precisión submétrica a este conjunto de datos.



Figura 5.5 Imagen zona de calibración. Comuna de Villa O'Higgins.

En la Tabla 5.4 se enuncian los kilómetros lineales y superficie cubierta (hectáreas) por cada perfil sobrevolado.

Tabla 5.4 Detalle por día de trabajo, perfiles sobrevolados en la zona. Distancia lineal (km).

Fecha	Perfil	km
02-10-2015	T15-T15’	16
	T15’-T16	17
	T16’-T18	17
	T17-T18'	7
Total		**57**
10-10-2015	T-T'	66
	T3’-T4'	11
	T4-T4'	29
	T6-T9	11
	T7-T7'	10
	T10-T11'	16
	T11-T12	10
Total		**153**

En los dos días de medición se midió a lo largo de 210 km lineales, lo que sumado a los 454 km realizado en el año 2014, totaliza un mayor número de kilómetros lineales solicitados en las bases técnicas del proyecto.

5.4.7 Comparación entre datos topográficos

Para la comparación de modelos topográficos superficiales, se utilizó el registro del año 1975 (DEM realizado por el IGM), el modelo satelital SRTM del año 2000 y el de topografía superficial generada a partir de mediciones del sistema CAMs (Figura 5.6), siendo la superficie de referencia el DEM de 1975 por su mayor antigüedad. Todas las elevaciones fueron re-muestreadas (*resampling*) a una resolución común de 50 metros,

mediante el cálculo del promedio de todos los puntos que se ubicaban dentro de una grilla con esta resolución.

Considerando que la precisión de los datos LiDAR respecto a los otros modelos es de un orden de magnitud superior (submétrica), tanto en la horizontal como en la vertical, no resultó necesario el co-registro entre los diferentes modelos. Las elevaciones fueron llevadas a un mismo sistema vertical. En base a lo anterior, se transformaron todos los DEM a elevaciones elipsoidales, usando el modelo de ondulación geoidal EGM96 (http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm96/egm96.html).

Para fines comparativos con datos previos, a estos dos vuelos láser se les asignará una fecha única de marzo de 2015.

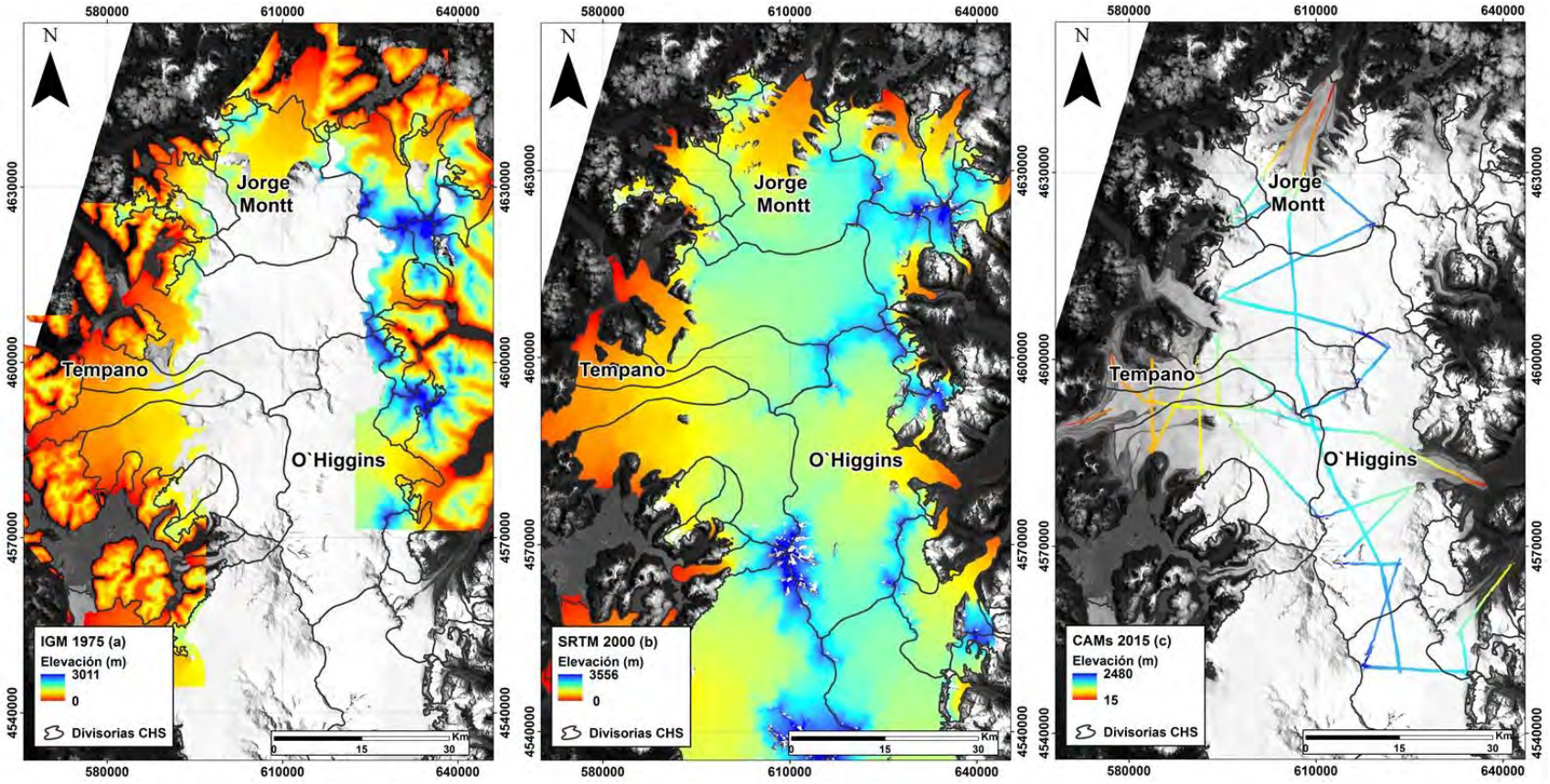


Figura 5.6 Modelos utilizados para la comparación de elevación interanual. (a) IGM; (b) SRTM y (c) CAMs. (Imagen de fondo, Landsat8 14 de enero del 2015, proyección UTM, Zona 18S, Datum WGS84).

5.5 Resultados

Los resultados (Tabla 5.5), entre los diferentes modelos a lo largo de la totalidad de los perfiles (Figura 5.1), indican cambios negativos en prácticamente toda la zona de estudio según Figura 5.9 para el periodo 1975-2015 y Figura 5.10 entre 2000-2015.

Tabla 5.5 Tasas de cambio de elevación Δh/Δt - m/a (metros por año) promedio y valores máximos cubiertos.

Periodo	Diferencia de elevación (m/a)	
	Promedio	Máxima
1975-2015	-3.2 ± 0.5	-16.5 ± 0.5
2000-2015	-0.8 ± 0.7	-21.6 ± 0.7

Además, se cuantificaron las diferencias de elevación según perfiles L-L′ y T-T′ (Tabla 5.6) en todos los periodos donde existen datos de superposición en función de la distancia (Figura 5.7 y Figura 5.8).

Tabla 5.6 Tasas de cambio de elevación Δh/Δt (m/a) y valores máximos en zonas con traslape de datos perfiles L-L' y T-T' (Ver Figura 5.1 para ubicación)

Perfil	Periodo	km	Promedio	Máxima	Observación
L-L'	1975-2000	0 - 16	-7.5 ± 0.6	-9.7 ± 0.6	Gl. Jorge Montt
	1975-2015		-8.3 ± 0.5	-11.3 ± 0.5	
	2000-2015		-9.6 ± 0.7	-15.2 ± 0.7	
	2000-2015	16 - 28	-1.7 ± 0.7	-4.3 ± 0.7	
		28 - 100	0.1 ± 0.7	-0.6 ± 0.7	*Plateau* CHS
T-T'	1975-2000	0 -18	-2.5 ± 0.6	-3.3 ± 0.6	Gl. Tempano
	1975-2015		-2.0 ± 0.5	-2.7 ± 0.5	
	2000-2015		-1.2 ± 0.7	-1.8 ± 0.7	
	2000-2015	18 - 48	-0.1 ± 0.7	-0.8 ± 0.7	*Plateau* CHS
	1975-2000	48 - 63	-3.5 ± 0.6	-6.9 ± 0.6	Gl. O'Higgins
	1975-2015		-2.2 ± 0.5	-4.3 ± 0.5	
	2000-2015		-0.1 ± 0.7	-0.7 ± 0.7	

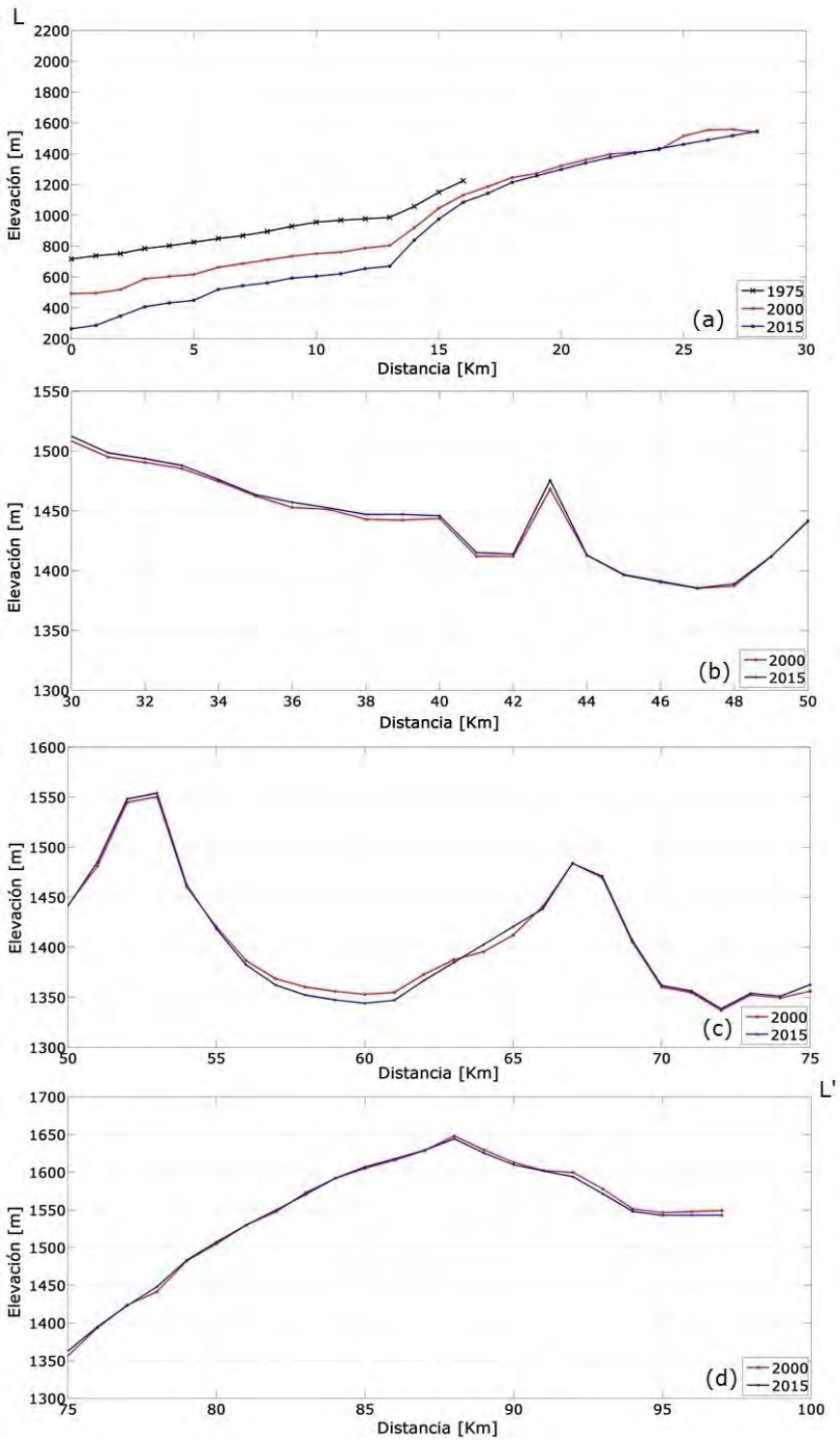


Figura 5.7 Perfil de elevación L-L' (m) con DEM utilizados (1975, 2000, 2015). Tramos: (a) 0 -30km; (b) 30-50km; (c) 50-75km y (d) 75-100km.

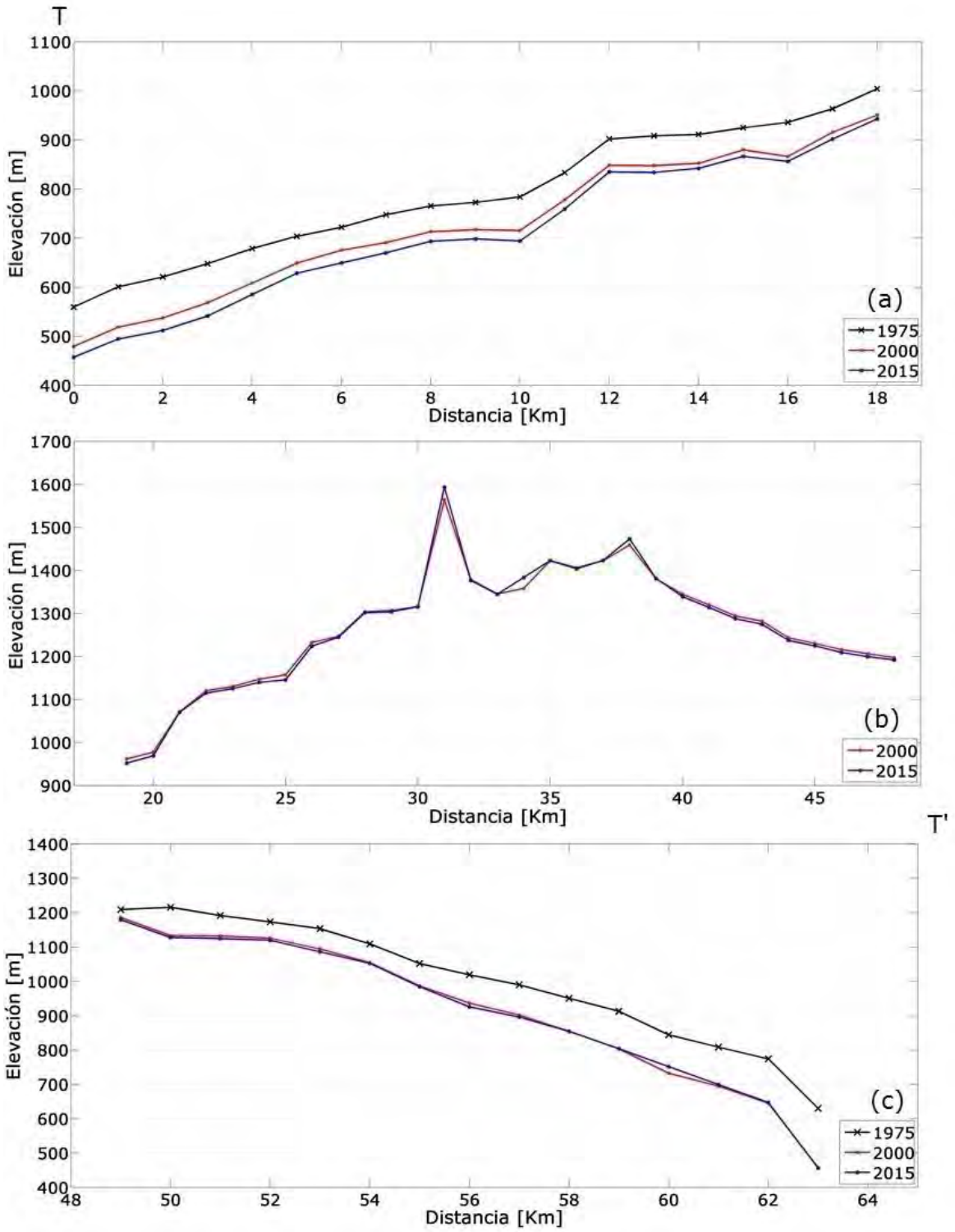


Figura 5.8 Perfil de elevación T-T' (m) con DEM utilizados (1975, 2000, 2015). Tramos: (a) 0-18km; (b) 18-48km y (c) 48-65km.

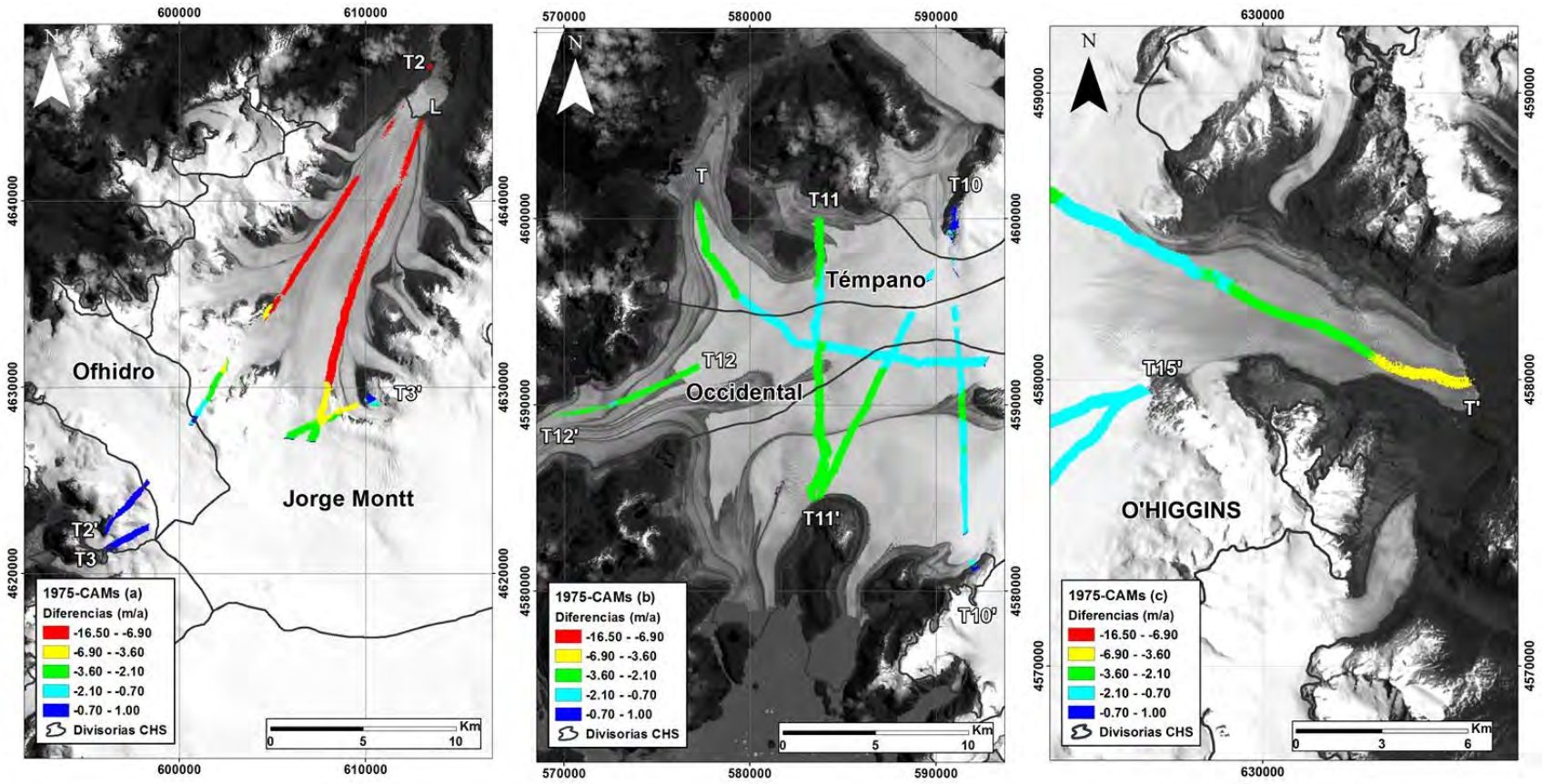


Figura 5.9 Cambios de elevación CHS (m/a), CAMs- IGM 1975. (a) Zona de traslape glaciar Jorge Montt, (b) Zona de traslape glaciar Tempano y (c) Zona de traslape glaciar O'Higgins (Imagen de fondo, Landsat8 14 de enero del 2015, proyección UTM, Zona 18S, Datum WGS84).

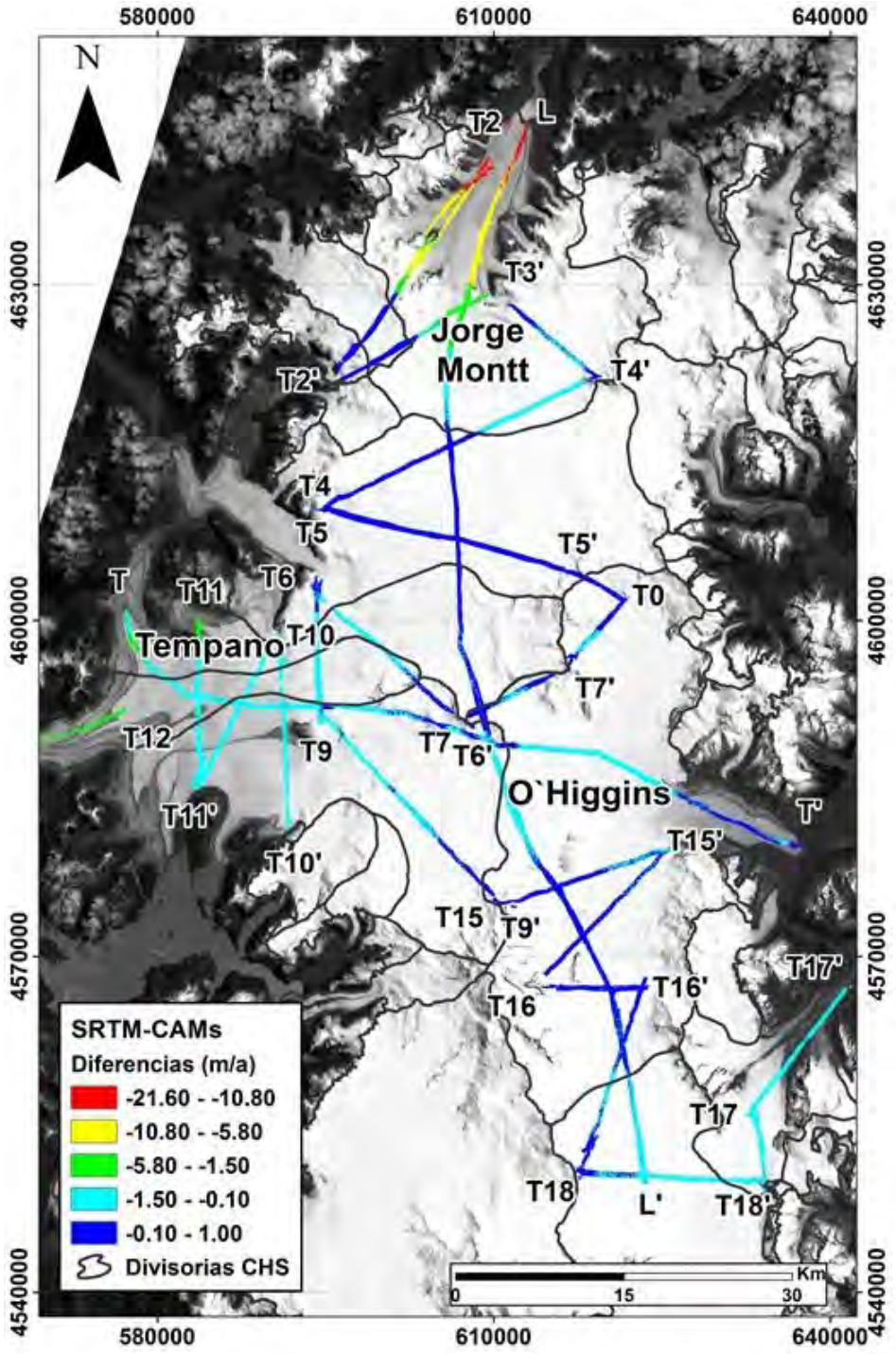


Figura 5.10 Cambios de elevación CHS (m/a), CAMs-SRTM 2000 (Imagen de fondo, Landsat8 14 de enero del 2015, proyección UTM, Zona 18S, Datum WGS84).

5.6 Discusión y conclusiones

Con los datos generados a partir de las campañas LiDAR 2014 y 2015, se obtuvieron las tasas de cambio de elevación respecto a las superficies de referencia representadas por los modelos IGM (1975) y SRTM (2000).

En general, las mayores tasas de pérdida se observaron en la zona frontal de los cuerpos de hielo, con valores máximos de -16.5 ± 0.5 m/a (2015-1975) y -21.6 ± 0.7 m/a (2015-2000), ambas en el glaciar Jorge Montt.

Al analizar los perfiles L-L' y T-T', la tendencia negativa está dada en función de la elevación. Por ejemplo, en la zona frontal del glaciar Jorge Montt (Figura 5.9a) se detectaron diferencias promedio entre -7.5 ± 0.6 m/a y -9.6 ± 0.7 m/a (perfil L-L') entre los diferentes periodos de medición, mientras en la zona de acumulación, las diferencias siguieron siendo negativas pero con una tasa muy inferior que promedió -1.7 ± 0.7 m/a (Tabla 5.6). Para la transecta T-T' el patrón negativo se mantuvo en las zonas bajas de los glaciares Témpano y O'Higgins, aunque con un orden de magnitud inferior al determinado para el glaciar Jorge Montt. La tasa de cambio promedio fue de -2.0 ± 0.5 m/a y -2.2 ± 0.5 m/a en los glaciares Témpano y O'Higgins respectivamente.

Un resultado a destacar es que en la zona del *plateau* de CHS no hay diferencias de elevación significativas (promedio de 0.1 ± 0.7 m/a y máximas de 0.6 ± 0.7 m/a), específicamente a partir del km 30 en el perfil L-L' y entre los km 20 y 48 del perfil T-T' (Figura 5.7 y Figura 5.8).

La no detección de cambios de elevación en el *plateau* de CHS puede deberse a que efectivamente la acumulación no ha tenido cambios en las últimas décadas [*Schaefer et al.*, 2015], o que debido a la alta

precipitación nivosa [*Schwikowski et al., 2013*], las diferencias de elevación solo muestran variabilidad interanual de la precipitación.

Respecto de la comparación con estudios previos, se puede concluir que los resultados son coincidentes especialmente en las zonas bajas de los glaciares en estudio, por ejemplo, en Rignot *et al.* [2003] que comparó el modelo SRTM del año 2000 con la cartografía 1:50,000 del IGM generada a partir de un levantamiento aerofotogramétrico de 1975, detectando un adelgazamiento máximo de 18 m/a en el Glaciar Jorge Montt. Datos similares fueron descritos en Rivera *et al.* [2012b] para el frente del Glaciar Jorge Montt, que obtuvo entre los años 2000 y 2002, una tasa de adelgazamiento de 31 m/a (SRTM con datos LiDAR). Para perfiles LiDAR medidos entre los años 2002 y 2008, la taza de adelgazamiento promedio es de 2.8 m/a, la cual se incrementa a 22 m/a entre 2008 y 2010. En este sentido, se aprecia que en el largo plazo el glaciar Jorge Montt ha experimentado un incremento en su adelgazamiento.

En tanto que Willis *et al.* [2012] comparó el modelo DEM SRTM (2000) con un set de DEMs del sensor ASTER (2012) para todo CHS. En esta comparación, se detectaron cambios de elevación que fluctúan entre -20 y -2 m/a.

Si bien la cobertura de datos LiDAR es limitada espacialmente respecto a los otros DEM (Figura 5.6), se pudo obtener diferencias de elevación en todos los periodos, confirmándose el adelgazamiento en la mayor parte de las zonas bajas de los perfiles longitudinales y transversales de la zona de estudio.

6 Estudio de espesor de hielo en la zona norte de Campo de Hielo Sur

6.1 Resumen

Se presentan los resultados finales de espesor de hielo medido en los perfiles longitudinales y transversales definidos en este proyecto para la zona norte de Campo de Hielo Sur, utilizando el método de radio eco sondaje aerotransportado, y la acumulación de nieve-neviza en meseta, mediante radio eco sondaje terrestre.

El método de radar empleado permitió obtener un espesor máximo de hielo de 581 ± 6 m en CHS (en el corredor Hicken, localizado entre glaciares O'Higgins y Viedma), con un espesor promedio de 219 m y una desviación estándar de 126 m. No obstante lo anterior, debido a las características de los glaciares de CHS, tales como hielo temperado, topografía irregular con presencia de grietas y flujo de agua supraglaciar, la propagación de ondas electromagnéticas en las frecuencias de radar se ve reducida, impidiendo detectar los retornos subglaciares de la interface hielo-roca por sobre el máximo medido en este estudio.

La acumulación anual estimada de nieve-neviza en meseta, cercana a la divisoria entre los glaciares Greve y O'Higgins, es de 0.79 ± 0.1 m de nieve por año, usando los datos obtenidos mediante radar terrestre y considerando que cada capa de acumulación representa el período de un año hidrológico.

Se midió la totalidad de los perfiles incluidos en las bases técnicas de este proyecto (aproximadamente 440 km), habiéndose detectado fondo rocoso, y por ende espesor de hielo, en 132 km lineales (30% del total medido). Se cumplió por lo tanto el objetivo principal de determinar el

espesor de hielo para dos perfiles longitudinales y nueve transversales mediante el uso de un sistema de radar aerotransportado.

6.2 Introducción

El radio eco sondaje (RES) es un método de prospección geofísica, que consiste en el uso de un sistema que genera un pulso electromagnético de corta duración, de gran amplitud y de banda ancha, generalmente utilizando una frecuencia central que puede estar comprendida entre 1 a 50 MHz [*Plewes and Hubbard*, 2001]. Este pulso es generado por un transmisor de impulso de alto voltaje y emitido por una antena transmisora. El pulso viaja primero por el aire (en el caso de sistemas aerotransportados) y luego por el hielo. Este pulso es reflejado parcialmente por las variaciones de permitividad eléctrica existente en el hielo y reflejado principalmente en el lecho rocoso, retornando y siendo capturado por la antena receptora. Para determinar el espesor de hielo, se analizan los retardos del pulso recibido, las características de la fase y la amplitud del eco [*Bogorodsky et al.*, 1985].

Las pérdidas de señal son insignificantes para frecuencias menores a 100 MHz [*Arcone and Delaney*, 1984] y teóricamente las ondas electromagnéticas pueden penetrar hielo temperado a frecuencias menores que 35 MHz [*Watts and England*, 1976]. En este último caso, el principal obstáculo a la propagación de las ondas electromagnéticas es la presencia de cuerpos de agua, que producen una fuerte dispersión y atenuación de las ondas electromagnéticas. Debido a esto, el contraste producido por la variación en las propiedades dieléctricas de las capas se reduce, limitando la capacidad de detección en hielo temperado [*Annan*, 2009].

El tamaño de la antena a utilizar es inversamente proporcional a la frecuencia central de operación. De esta manera, para medir grandes

espesores de hielo temperado es necesario usar una baja frecuencia central, y por ende antenas de mayor envergadura. Por el contrario, si la medición es a menor profundidad (por ejemplo, para hacer análisis estratigráfico para obtener acumulación de nieve/neviza), es preferible usar una frecuencia más alta lo que implica antenas más pequeñas, con las que se obtiene mayor resolución.

Un sistema de radar puede ser instalado en plataformas aéreas [*Oberreuter et al.*, 2014; *Rivera et al.*, 2014; *Gacitúa et al.*, 2015], trineos [*Rivera and Casassa*, 2002], o simplemente caminando sobre el glaciar, portando los equipos en mochilas. La ventaja de usar un sistema aerotransportado es que se pueden realizar mediciones en grandes extensiones sobre la superficie del glaciar en un corto período de tiempo, permitiendo medir en zonas de difícil acceso por tierra, ya sea por la existencia de grietas o pendientes elevadas, aún más, considerando las condiciones meteorológicas de la zona de estudio, que presenta limitados períodos de tiempo para la realización de actividades de medición.

La experiencia previa en glaciares, principalmente en Patagonia, indica que el radar de impulso de baja frecuencia es adecuado para detectar espesor de hielo en glaciares temperados de Campo de Hielo Sur, teniendo en cuenta que los máximos obtenidos por estos sistemas son del orden de 700-800 m. Ejemplos de mediciones con radar de impulso terrestre de baja frecuencia se encuentran en el trabajo de Casassa [1992], primera medición de espesor de hielo en Chile usando radio eco sondaje, en la cual se logró detectar más de 600 m de espesor en la zona de ablación del Glaciar Tyndall, Raymond [2005b], quien reportó un espesor máximo de 740 m en el glaciar Tyndall, y Rivera [*Rivera and Casassa*, 2002], quien reportó 750 m de espesor en el paso Cuatro Glaciares. Zamora *et al.* [2009] obtuvieron 670 m en el glaciar Tyndall

usando un radar de impulso aerotransportado de frecuencia central 2 MHz. Blindow *et al.* [2011] detectaron hasta 700 m en el glaciar Nef, usando un radar de impulso aerotransportado a una frecuencia central de 30 MHz. En Campo de Hielo Norte, el CECs realizó en conjunto con DGA un estudio glaciológico en los Glaciares San Rafael, Nef y Colonia, obteniendo espesores del orden de 800 m, con un máximo de 842 m en el glaciar San Rafael, usando un sistema de radar aerotransportado de frecuencia central 20 MHz [*DGA*, 2012].

6.3 Objetivos

Determinar el espesor del hielo en la zona norte de CHS, mediante el uso de radio eco sondaje (RES), y comparar éstos resultados con los obtenidos en estudios previos.

Estimar la acumulación de nieve en la meseta de CHS, mediante el uso de radar terrestre de alta resolución.

6.4 Materiales y métodos

6.4.1 Instrumentación

6.4.1.1 Sistema de radar para acumulación de nieve

Para la medición de acumulación se utilizó un Radar de Penetración Terrestre (GPR) comercial de alta resolución, de marca *GSSI*, de tipo impulso y frecuencia central de operación de 400 MHz (Figura 6.1), el cual posee una resolución vertical teórica de 0.24 m aproximadamente en nieve.

Este sistema está compuesto por una unidad de control *SIR-3000*, la cual digitaliza y almacena los datos capturados en terreno. Además, el sistema incluye una unidad de antena en modo mono-estático, que consiste en un sólo módulo que contiene las antenas de transmisión y

de recepción: un transmisor generador de impulso de alto voltaje y un receptor analógico, este último encargado del acondicionamiento y amplificación de la señal capturada antes de la digitalización por parte de la unidad de control *SIR-3000*.



Figura 6.1 Radar GPR GSSI. Unidad de control SIR-3000 (izquierda) y antena de 400 MHz (derecha).

El sistema es transportado en un trineo atado a una moto de nieve, realizando la captura de datos a una velocidad constante. Para la georreferenciación se usa un GPS navegador marca *Garmin,* modelo *Monterra*, en el que se captura la posición en coordenadas UTM y la elevación sobre el nivel del mar en los puntos de inicio y término de cada medición.

6.4.1.2 Sistema de radar para espesor de hielo

Para las mediciones de espesor de hielo, se utilizó un sistema de radar de penetración terrestre (GPR según sus siglas en inglés) de tipo impulso, construido y desarrollado principalmente en Chile. Su frecuencia central de operación, definida por las dimensiones de la antena, es de 20 MHz, y su resolución vertical es de 4 m

aproximadamente en hielo temperado. El sistema está compuesto por dos antenas de tipo *bow-tie* (Figura 6.2), una de transmisión y otra de recepción, las cuales son transportadas en una estructura metálica de 5.5 m de ancho, 8 m de largo y 1.2 m de alto, y cuya masa es de aproximadamente 350 Kg. La estructura es transportada como carga colgante a 20 m bajo un helicóptero (*Eurocopter AS350-B3 Ecureuil*), a una velocidad de 20 m/s en medición, y a una altura entre 35 y 50 m sobre la superficie del glaciar (Figura 6.3), para así asegurar la mayor eficiencia del radar durante la captura de datos.



Figura 6.2 Detalle de la antena *Bow-Tie* de la parte transmisora del radar.



Figura 6.3 Vista del sistema de radar transportado como carga colgante, sobrevolando el *plateau*, en el Glaciar O'Higgins, durante la campaña de septiembre de 2015.

La mayor parte de los sistemas electrónicos del radar se encuentran contenidos en la estructura metálica, incluyendo un altímetro laser (para indicar la altura en tiempo real entre la antena y el suelo) y un GPS geodésico (*Javad Lexon GD*), cuya tasa de captura es 5 Hz. A bordo del helicóptero se utilizó dos computadores portátiles, uno para adquisición de datos del radar y otro de navegación. La comunicación entre la electrónica montada en la estructura y la cabina del helicóptero fue

realizada mediante un enlace de fibra óptica. El transmisor del sistema genera un impulso de 3200 V y 8 ns de tiempo de subida, a una frecuencia de repetición (PRF) de 3 kHz. El receptor del radar contiene una interfaz analógica y un sistema digital, y está equipado con un canal de captura de alta ganancia y otro de baja ganancia, para aumentar el rango dinámico de recepción del sistema. En este receptor, cada canal es digitalizado a 14 bits de resolución y a una frecuencia de muestreo de 400 *Mega Sampling Per Second* (MSPS). Todo el sistema de radar opera usando baterías, no dependiendo entonces de la energía eléctrica del helicóptero. En la Figura 6.4 puede apreciarse un diagrama del sistema de radar.

Durante todas las mediciones se utilizó una estación base GPS geodésica (*Javad Lexon GD*) con tasa de captura 1 Hz, para realizar el post-procesamiento diferencial de GPS (DGPS), y de esta forma obtener una georreferenciación precisa de cada traza capturada. La ubicación de la estación base fue en las cercanías del punto de operaciones, a una altura aproximada de 1.2 m sobre el nivel del suelo y libre de obstáculos laterales.

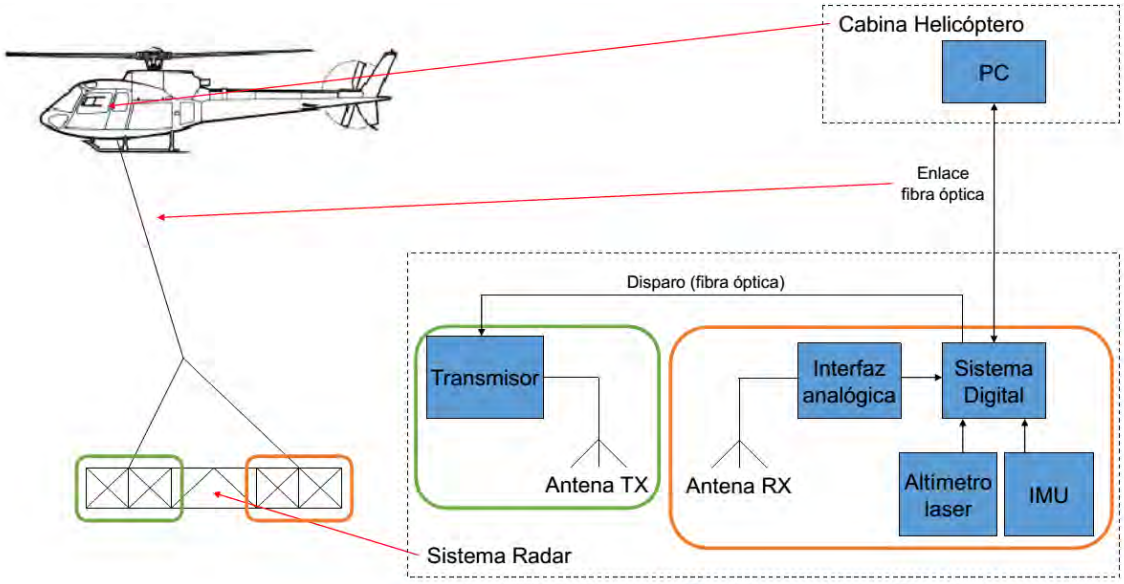


Figura 6.4 Esquema y diagrama en bloques del sistema de radar.

6.4.2 Captura de datos

6.4.2.1 Medición de acumulación de nieve

Durante la medición de acumulación, se realizó una primera travesía en motos de nieve el día 3 de octubre de 2014 para inspeccionar el terreno. Durante esta travesía, se instalaron cinco balizas a lo largo de la ruta (45 km, ida y vuelta, aproximadamente), para indicar una ruta segura y libre de grietas. Durante la jornada siguiente, 4 de octubre de 2014, se realizó una segunda travesía en motos de nieve comenzando en el campamento base (Glaciar Greve), pasando por la zona media del Glaciar O'Higgins y volviendo finalmente al inicio (Figura 6.5). En esta travesía se realizaron las mediciones con el sistema de radar *GSSI,* el cual fue transportado en un trineo atado a una moto de nieve a una velocidad constante de 8 km/h.

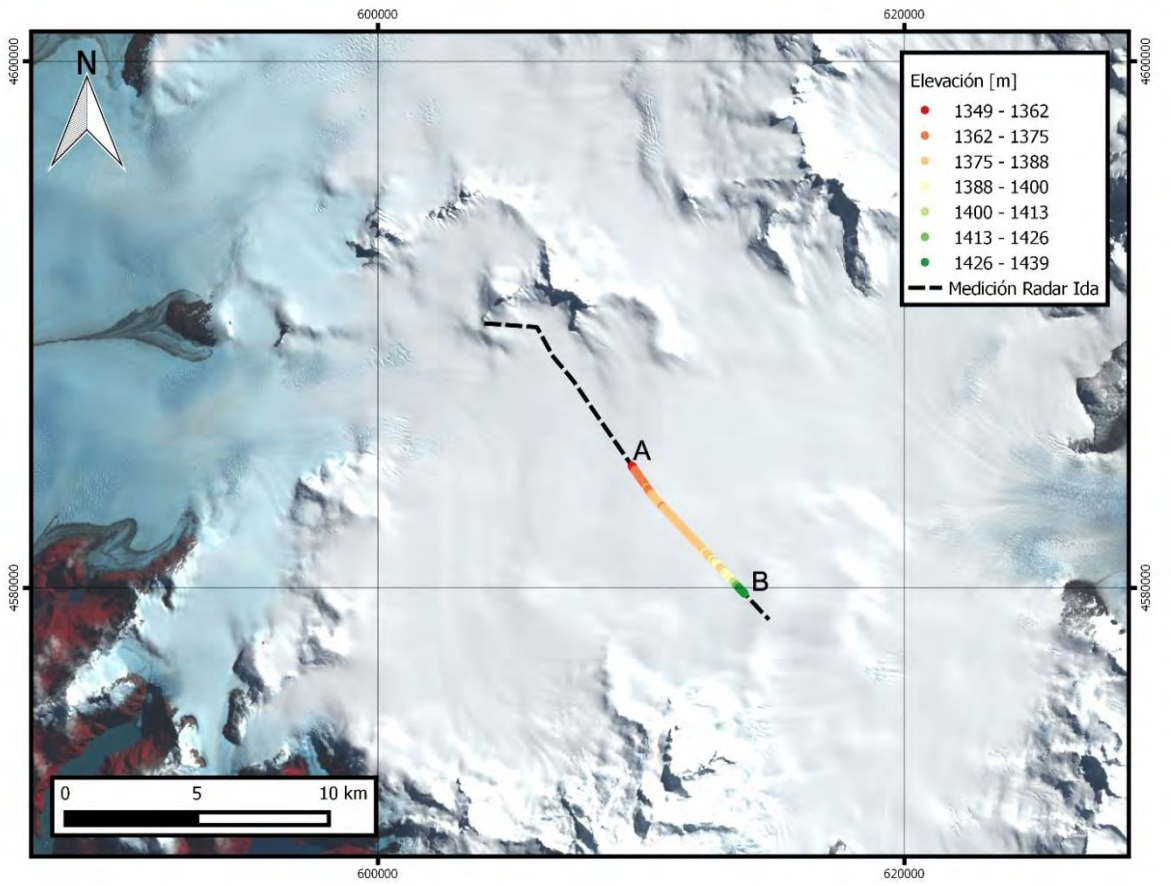


Figura 6.5 Mediciones con GPR realizadas en los glaciares Greve y O'Higgins. Los colores del perfil indican cota superficial. Imagen de fondo: Landsat 8, 16 de marzo de 2014, proyección UTM, zona 18S, Datum WGS84.

6.4.2.2 Medición de espesor de hielo

El proceso de captura de datos de radar se desarrolló en dos campañas: 2014 (agosto- septiembre), y 2015 (septiembre-octubre). Durante la primera campaña, la base de operaciones fue el aeródromo de Tortel. En la segunda campaña, las actividades realizadas antes del 25 de septiembre de 2015 se realizaron desde el aeródromo de Tortel, mientras que después del 25 de septiembre de 2015 las operaciones se realizaron desde el aeródromo de Villa O'Higgins. Para poder realizar operaciones con el radar aéreo, se debió esperar hasta tener

condiciones meteorológicas que aseguraran una operación en condiciones seguras, consistentes en escaso viento, para la estabilidad estructural del sistema de radar, y muy poca nubosidad, con la finalidad de contar con un buen contraste, siendo este punto el más crítico.

Durante la primera campaña de radar se realizaron tres vuelos, durante los días 27 de agosto, 3 y 6 de septiembre de 2014, cubriendo una extensión total de 130.5 km. En dichas operaciones, las líneas L1-L43, L2-L3 y L4-L5 fueron medidas parcialmente, mientras que la línea L29-L30 fue medida completamente.

Durante la segunda campaña en terreno, se completaron todas las líneas propuestas de medición de espesor de hielo, realizando operaciones los días 20 (2 vuelos), 21 y 28 de septiembre (2 vuelos) y el 1 de octubre de 2015. La distancia lineal recorrida fue de 310 km.

En la Figura 6.6, se presentan las líneas de vuelo realizadas en las campañas de 2014 y 2015, las que corresponden a un total de 440.5 km lineales. En la Tabla 6.1 se muestra el detalle de las líneas voladas por campaña y por fecha. Las líneas L19-L20, L21-L22, L23-L24, L39-L40 y L41-L42 fueron completadas en un solo vuelo, mientras que para el resto de las líneas fue necesario realizar hasta cuatro vuelos para completarlas, debido a las extremas condiciones meteorológicas registradas en la zona.

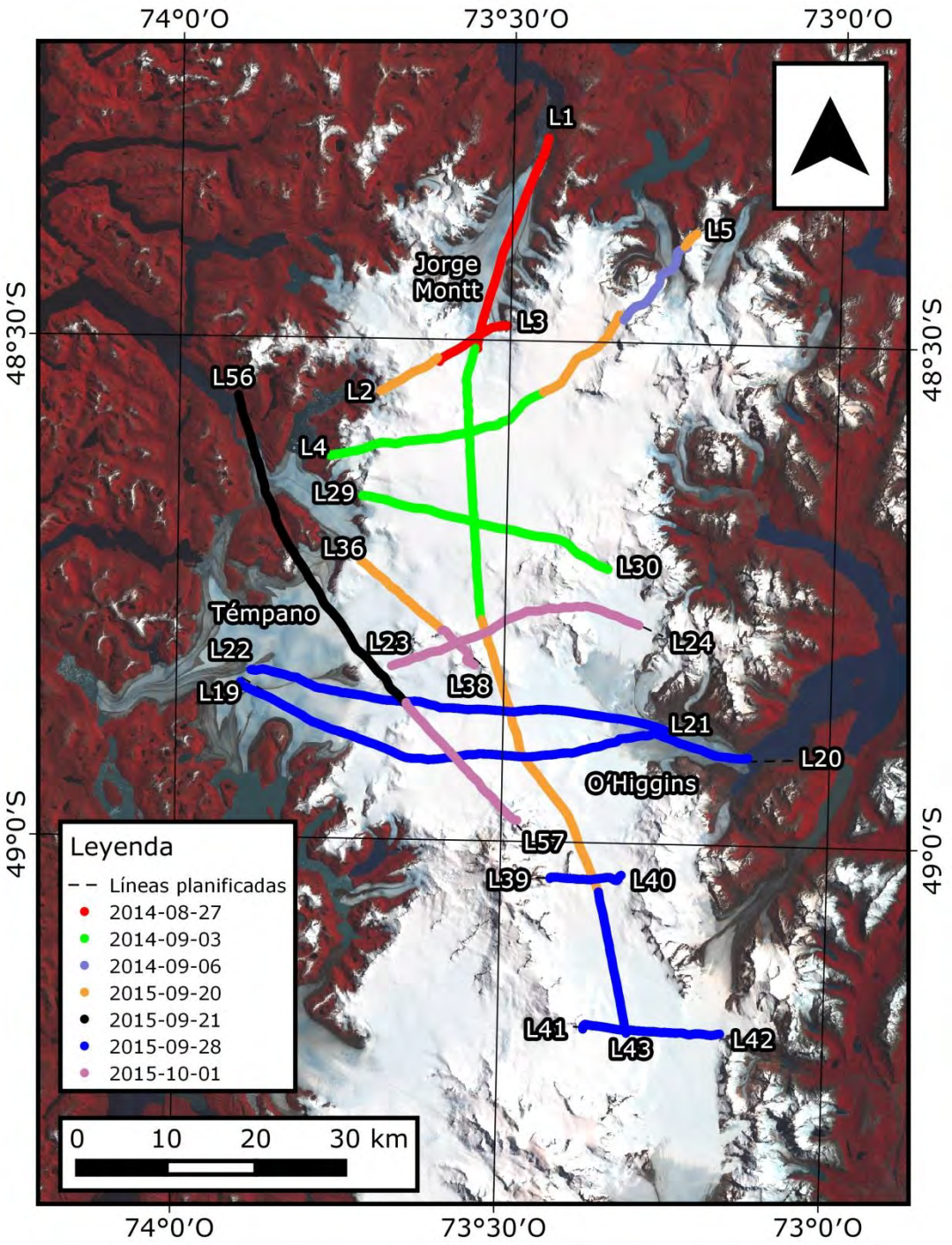


Figura 6.6 Líneas de vuelo completadas durante la primera y segunda campaña de medición de radar, incluyendo las fechas de medición. La imagen de fondo corresponde a Landsat 8 del 14 de enero de 2015, proyección UTM, Zona 18S, Datum WGS84.

Tabla 6.1 Detalle de cobertura temporal de mediciones de radar.

	Primera Campaña Radar			Segunda Campaña Radar			
Perfil	27/08/2014	03/09/2014	06/09/2014	20/09/2015	21/09/2015	28/09/2015	01/10/2015
L1-L43							
L2-L3							
L4-L5							
L19-L20							
L21-L22							
L23-L24							
L29-L30							
L36-L38							
L39-L40							
L41-L42							
L56-L57							

6.4.3 Procesamiento de datos

6.4.3.1 Procesamiento de datos de radar para acumulación de nieve

Los datos obtenidos por el radar de alta frecuencia (400 MHz) fueron procesados en el software REFLEXW 7.0 al igual que los datos de radar de baja frecuencia.

Para realizar la georreferenciación de cada traza, se consideraron los puntos medidos con el GPS Garmin y se interpolaron linealmente, considerando el número de trazas respectivo a cada *track*. Posteriormente se importaron los archivos iniciales en REFLEXW, en el cual se integraron los datos de georreferenciación interpolados con los datos de radar.

El procesamiento de los datos de radar requirió de las siguientes etapas:

a) Aplicación de filtro pasabanda Butterworth de segundo orden (entre 200 y 500 MHz), para reducción de ruido de banda ancha.
b) Filtrado *dewow* de 5 ns para eliminación de frecuencias muy bajas.
c) Promediado de trazas (8 trazas) para reducción de ruido incoherente.
d) Filtro de medianas de 4 muestras en sentido horizontal para reducción de ruido.
e) Ajuste de tiempo cero (reflector correspondiente al acoplamiento de las antenas de transmisión y recepción).
f) Aplicación de una curva de ganancia variable con la profundidad (*energy-decay*), para visualizar mejor los retornos a mayor profundidad.

A diferencia de los datos de radar de baja frecuencia, se descartó el proceso de migración, debido a que éste provoca una pérdida importante de contraste entre las isocronas y el resto de los datos, impidiendo una correcta identificación de éstas. De esta forma, a partir de los datos procesados sin migrar, se realizó la vectorización de las isocronas detectadas en la medición. Posteriormente, se calculó la acumulación de nieve/neviza a lo largo de la trayectoria, restando la profundidad de cada par de isocronas consecutivas. Finalmente, se calculó el promedio de acumulación espacial por cada isocrona detectada y el promedio de estos últimos valores, para obtener una estimación representativa espacialmente.

6.4.3.2 Procesamiento de datos de radar para espesor de hielo

Primero, se realizó el procesamiento diferencial con los datos del GPS del sistema de radar y la estación base, usando el software *Grafnav 8.3*,

con lo que se logró obtener una referencia geográfica de los datos de radar tal que las elevaciones poseen precisión centimétrica. El resultado consiste en un archivo formato ASCII con la información de número de traza, posición en coordenadas UTM correspondiente y la elevación (m snm).

Posteriormente, se procesaron los datos de radar en el software REFLEXW v 7.0, donde se realizó la integración entre éstos y los datos de GPS con procesamiento diferencial. De esta forma, se referenciaron los datos de radar espacialmente (georreferenciación), definiendo la posición de cada traza obtenida.

Durante el procesamiento de los datos, se asumió que los medios caracterizados por los datos de radar aéreo (aire y hielo) son homogéneos, sus velocidades de propagación son constantes y sus pérdidas son despreciables. Estos medios presentan dos interfaces detectables debido a su alto contraste dieléctrico, denominadas interfaces aire-hielo y hielo roca.

Para frecuencias superiores a 1 MHz, la permitividad dieléctrica relativa del hielo sólido (ε_i) ha sido estimada en 3.2 [*Evans*, 1965]. La velocidad de propagación de la onda electromagnética en el hielo (v_i) se obtiene a partir de:

$$v_i = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_i}} \qquad \textbf{(6.1)}$$

donde c es la velocidad de la onda electromagnética en el vacío (0.3 m/ns). Conforme a lo anterior, la velocidad de propagación de la onda electromagnética en el hielo es de 0.168 m/ns [*Glen and Paren*, 1975], mientras que para el aire aplica la velocidad correspondiente al vacío.

Cuando la velocidad de propagación es conocida y constante, es posible estimar la profundidad del reflector (d) (interfaces aire-hielo y hielo-roca) usando la expresión:

$$d = \frac{v_i t}{2} \qquad \textbf{(6.2)}$$

donde t es el tiempo de viaje de la señal.

De acuerdo a lo anterior, se realizó el procesamiento de forma sistemática para todos los perfiles en estudio. El procesamiento contiene los siguientes pasos:

a) Importación de los datos desde su formato nativo (binario) al formato REFLEXW.
b) Georreferenciación de cada traza de radar con la posición obtenida mediante GPS.
c) Unión de los archivos correspondientes a cada perfil, ya sean transversales o longitudinales.
d) Cálculo de la distancia total del perfil y realización de una interpolación equidistante cada 10 m por traza.
e) Filtrado de los datos para reducción de ruido, utilizando filtros pasa banda *Butterworth* entre 10 y 30 MHz y una curva de ganancia (*Energy Decay)* para visualizar mejor los retornos a mayor profundidad.
f) Vectorización de la interfaz aire-hielo.
g) Sustracción de la capa de aire, usando la interfaz aire-hielo vectorizada.
h) Aplicación de migración de Kirchhoff, considerando un ancho de suma de 200 trazas y una velocidad de propagación de onda electromagnética de 0,168 m/ns. Este proceso permite la eliminación de hipérbolas en los radargramas producto de reflexiones de onda laterales indeseadas en el aire o en el hielo.
i) Identificación del fondo rocoso para su posterior vectorización y obtención de datos cuantificables (espesor de hielo).
j) Conversión de archivos REFLEXW (vectorizaciones de interfaz aire-hielo y hielo-roca) a formato ASCII.
k) Representación de los datos de espesor de hielo georreferenciados en un SIG.

Con los datos de la vectorización de la interfaz aire-hielo, se obtuvo la elevación superficial (Z_{sub}) a partir de:

$$Z_{sup} = Z_{ant} - \left(d_{air} - \frac{v_{air} t_0}{2}\right) \qquad \textbf{(6.3)}$$

donde z_{ant} es la elevación de la estructura colgante que contiene las antenas del radar, d_{air} es la distancia equivalente entre el comienzo de la captura de datos por traza y la superficie del hielo, v_{air} es la velocidad de propagación de onda electromagnética en el aire (0.3 m/ns) y t_0 es el tiempo de viaje de la onda entre el trasmisor y el receptor.

Una vez que la información de distancia de perfil, espesor de hielo y elevación (m snm) de la superficie de hielo se exportó en un formato ASCII, se calcularon los siguientes valores para cada perfil:

a) Longitud, elevación mínima y máxima de cada perfil longitudinal y transversal.
b) Espesor máximo, mínimo, promedio y su desviación estándar (DE) en cada perfil longitudinal y transversal. DE entrega información sobre el rango de variación que tienen los espesores respecto del promedio.
c) Espesor promedio y DE del conjunto de datos en los perfiles transversales y longitudinales definidos.
d) Espesor máximo del conjunto de datos de espesor obtenidos (máximo espesor medido en el glaciar).

6.5 Resultados

6.5.1 Acumulación de nieve

En la Figura Figura 6.7 se muestra el radargrama obtenido entre las torres nivométricas 1 y 2 en el plateau central que separa los glaciares Greve y OHiggins. En la parte superior del radargrama se estima que el radar no tiene una buena resolución para distinguir el primer metro y medio, por lo que se descartará del análisis. En esta capa superficial se estima que deberían haber por lo menos 2 capas anuales de acuerdo al balance de masa medido con las torres nivométricas.

Como se puede ver en la mayor parte del resto radargrama, se detectaron varias isócronas que, pueden ser asociadas a capas de nieve de igual edad (continuas) con permitividades dieléctricas distintivas, probablemente generadas por periodos de acumulación asociables a años hidrológicos. En algunas capas el contraste es mucho menor, por lo que no se interpretaron en toda la extensión del trayecto estudiado. Este cambio de contraste puede atribuirse principalmente a la pendiente de las capas, ya que si éstas poseen pendientes muy inclinadas, resulta más difícil ser detectadas por la antena de radar, ya que la onda reflejada es dirigida en una dirección lejana a la antena receptora.

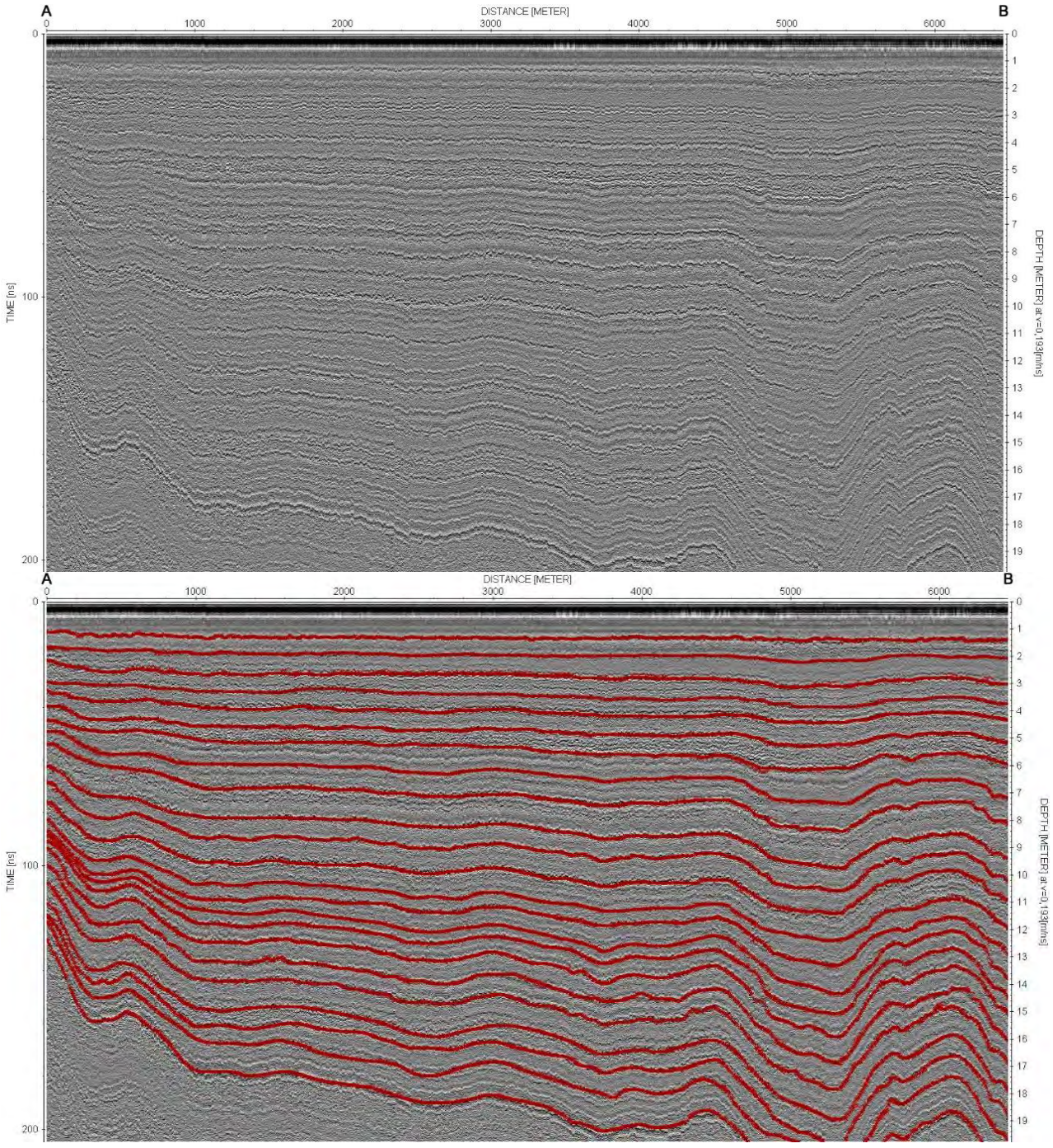


Figura 6.7 Radargrama del perfil medido con el radar terrestre. La imagen superior corresponde al radargrama sin datos interpretados. La inferior incluye las capas de acumulación detectadas (Localización del perfil A-B en Figura 6.5).

En la Tabla 6.2 se muestra el espesor de las primeras 20 capas detectadas, caracterizados por su promedio, desviación estándar y otros datos estadísticos, calculados con el supuesto de que la velocidad de propagación de la onda electromagnética de radar en nieve/neviza es de 0.193 m/*n*s [*Spikes et al.*, 2004].

Tabla 6.2 Datos estadísticos del espesor de las primeras 20 capas detectadas en la interpretación de los datos de acumulación de nieve, por capa de acumulación.

Capa	Promedio [m]	Desviación Estándar [m]	Mediana [m]	Moda [m]	Mínimo [m]	Máximo [m]
1	*					
2	0.63	0.07	0.62	0.66	0.45	0.84
3	0.79	0.09	0.78	0.81	0.48	0.98
4	0.69	0.08	0.70	0.75	0.47	0.83
5	0.60	0.07	0.60	0.59	0.31	0.79
6	0.71	0.07	0.71	0.65	0.46	0.91
7	0.66	0.15	0.68	0.52	0.40	1.08
8	0.91	0.17	0.88	0.80	0.31	1.31
9	0.84	0.13	0.86	0.86	0.44	1.11
10	1.16	0.09	1.15	1.09	0.80	1.40
11	0.75	0.08	0.75	0.78	0.50	0.97
12	1.08	0.10	1.10	1.21	0.78	1.27
13	0.69	0.11	0.68	0.70	0.39	1.01
14	0.58	0.13	0.55	0.57	0.29	0.94
15	0.63	0.22	0.66	0.87	0.09	1.14
16	0.49	0.16	0.46	0.46	0.09	1.08
17	0.64	0.09	0.64	0.68	0.28	1.02
18	0.79	0.11	0.81	0.73	0.37	1.09
19	0.77	0.11	0.75	0.73	0.46	1.11
20	1.05	0.10	1.05	1.00	0.65	1.49

*Primera capa de 1.32 m de espesor debería corresponder al menos a 2 años que no se pueden diferenciar bien.

Se visualiza una tendencia generalizada a una distribución normal en los datos de espesor por capa, dado que los valores obtenidos para los promedios, medias y medianas difieren en cifras del orden de los centímetros. Existen cuatro capas donde estas diferencias son mayores (del orden de los decímetros), específicamente las capas 7, 8, 12 y 15. De esta misma tabla, es posible calcular el promedio de espesor de todas las capas, el cual corresponde a 0.76 m, lo que representaría una acumulación promedio anual de nieve de ese monto.

6.5.2 Espesor de hielo

A continuación se presentan y discuten los resultados del análisis de los datos de radar aerotransportado, registrados y procesados durante la ejecución del presente proyecto. De los datos de radar aerotransportado, se obtuvo el espesor de hielo y la topografía subglacial para los dos perfiles longitudinales y nueve transversales definidos previamente en la sección 6.4.2, datos que se compararon con el modelo de espesor de hielo de *Huss* [*Huss and Farinotti*, 2012] y los datos de mediciones gravimétricas en la misma zona de estudio [*Gourlet et al.*, 2016].

En la Figura 6.8, se muestran todas las líneas de vuelo con retorno de fondo y posterior cálculo de espesor de hielo que incluye los perfiles longitudinales y transversales. El espesor de hielo es representado mediante una escala de colores, donde el color verde indica menor espesor de hielo, y el color rojo indica un valor máximo. La distancia total recorrida fue de 440.5 km, con valores de espesor interpretado para 132 km, lo que equivale a un 30 % de la distancia recorrida.

En la Figura 6.9, se muestra la elevación subglacial en código de colores, donde el color verde indica menor elevación y el color rojo mayor elevación. Se observa que existen zonas con topografía subglacial

bajo el nivel del mar, específicamente en las lenguas de los glaciares Jorge Montt y Bernardo.

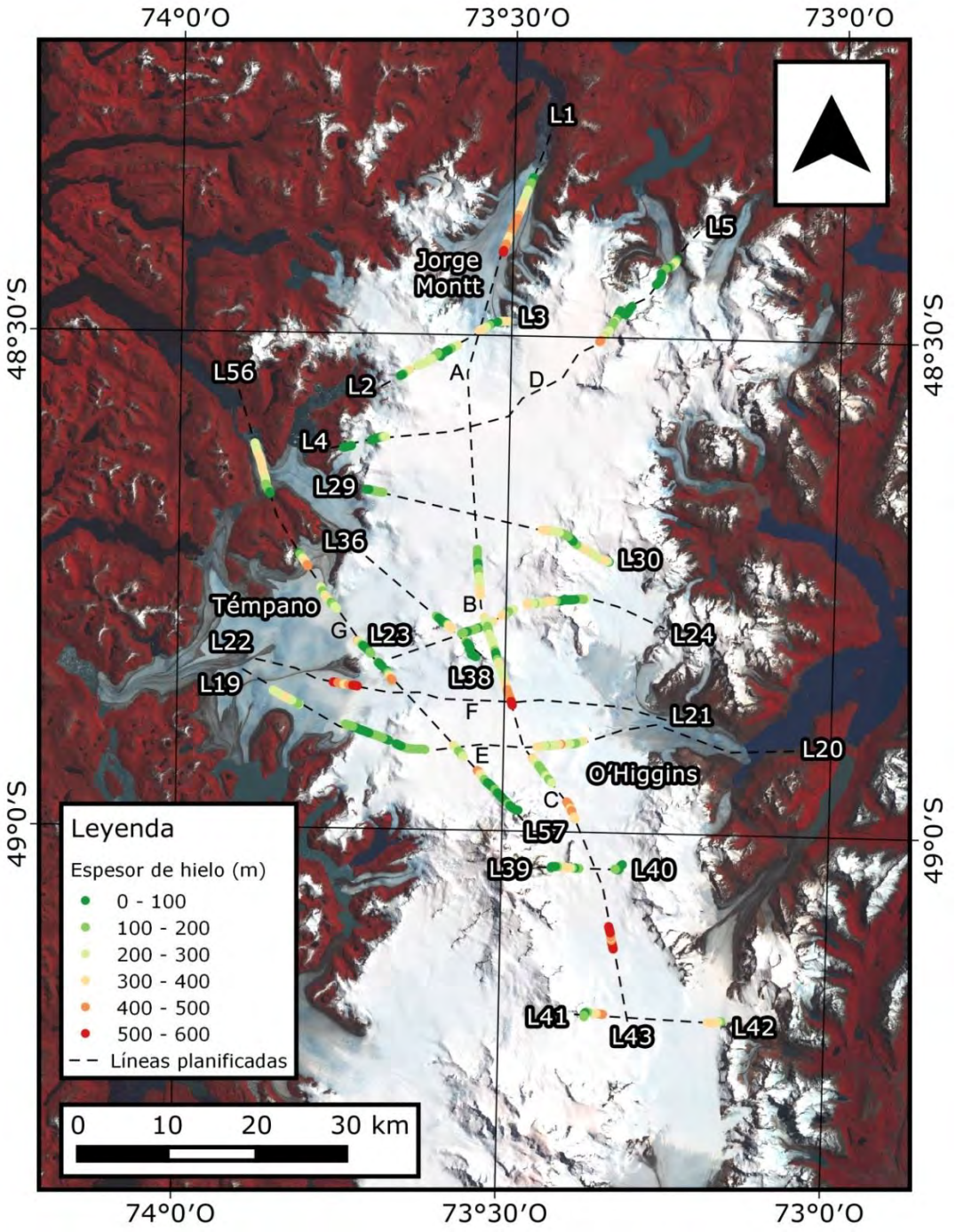


Figura 6.8 Perfiles longitudinales y transversales con interpretación del espesor de hielo (en escala de colores). La imagen de fondo corresponde a Landsat 8 del 14 de enero de 2015, proyección UTM, Zona 18S, Datum WGS84.

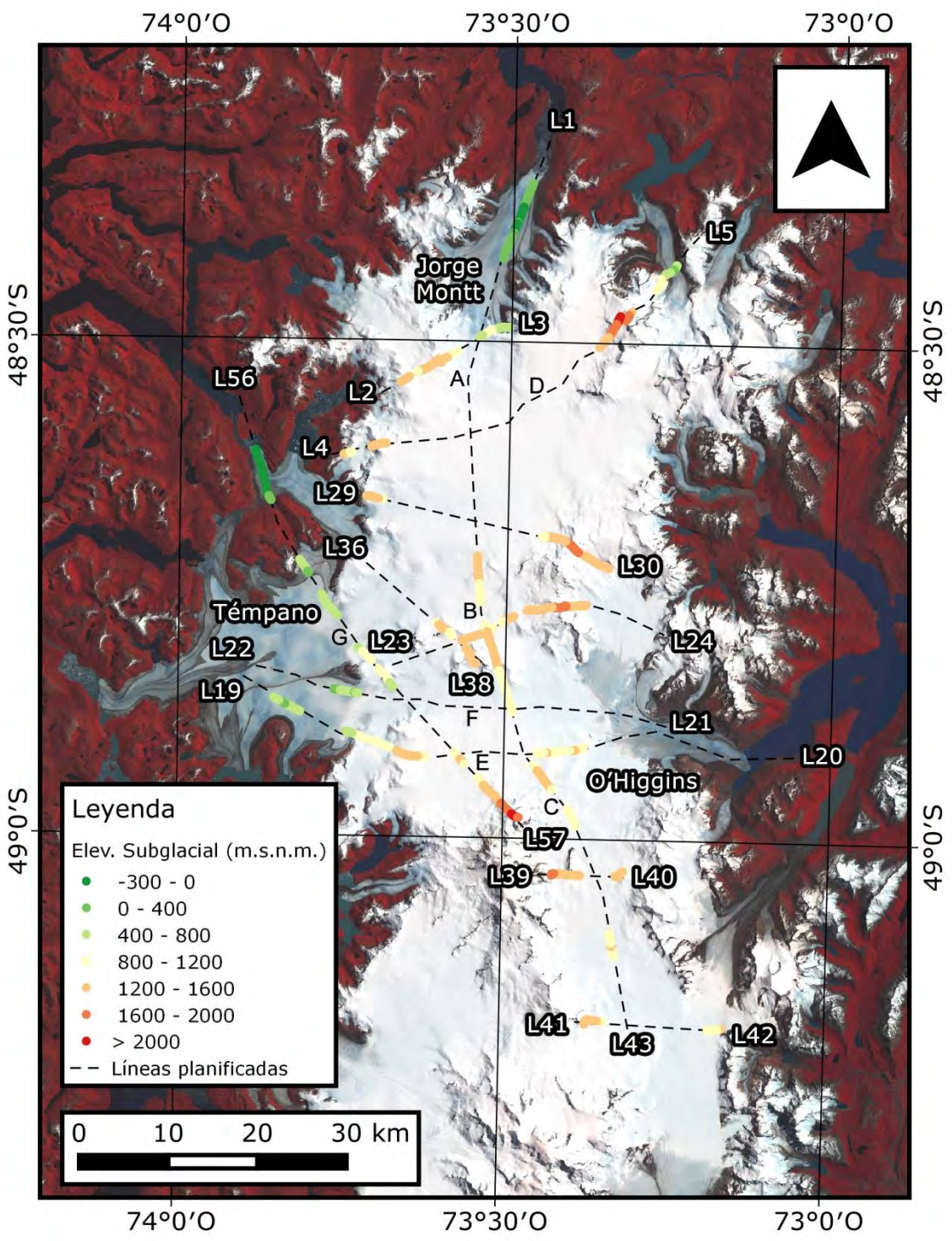


Figura 6.9 Perfiles longitudinales y transversales con elevaciones subglaciales (en escala de colores). La imagen de fondo corresponde a Landsat 8 del 14 de enero de 2015, proyección UTM, Zona 18S, Datum WGS84.

A continuación, se presentan los detalles de espesor y topografía subglacial por cada perfil longitudinal y transversal del proyecto. Además, por cada perfil se incluye un histograma de espesor de hielo, con el fin de señalar la distribución de espesores, permitiendo así observar en qué rango de valores se encuentra la menor y mayor cantidad de datos interpretados.

6.5.2.1 Perfil longitudinal L1-L43

La Figura 6.10, Figura 6.11, Figura 6.12 y Figura 6.13 muestran el radargrama correspondiente al perfil longitudinal L1-L43. Debido al largo del perfil, este se dividió en cuatro resultando los radargramas L1-A, A-B, B-C y C-L43 (A, B y C en Figura 6.8). Las líneas verticales amarillas representan las intersecciones con los perfiles transversales L2-L3, L4-L5, L23-L24, L21-L22, L19-L20, L39-L40 y L41-L42. En la imagen inferior de cada uno de los radargramas se representa el fondo rocoso detectado con una línea roja. El espesor máximo detectado es de 581 m, el espesor mínimo es de 10 m, el espesor promedio es de 297 m con una desviación estándar de 134 m. Las zonas sin interpretación del fondo rocoso "oscuras" corresponden a zonas de dispersión de señal de retorno producido por hielo temperado y grietas de superficie. La distancia total de este perfil es de 105 km.

La Figura 6.14 muestra la distribución del espesor de hielo a lo largo del perfil longitudinal L1-L43. La abscisa corresponde al espesor detectado en metros y la ordenada corresponde al porcentaje del total de trazas con datos de espesor de hielo. Se observa que para los espesores entre 200 y 300 m se concentra la mayor cantidad de datos interpretados.

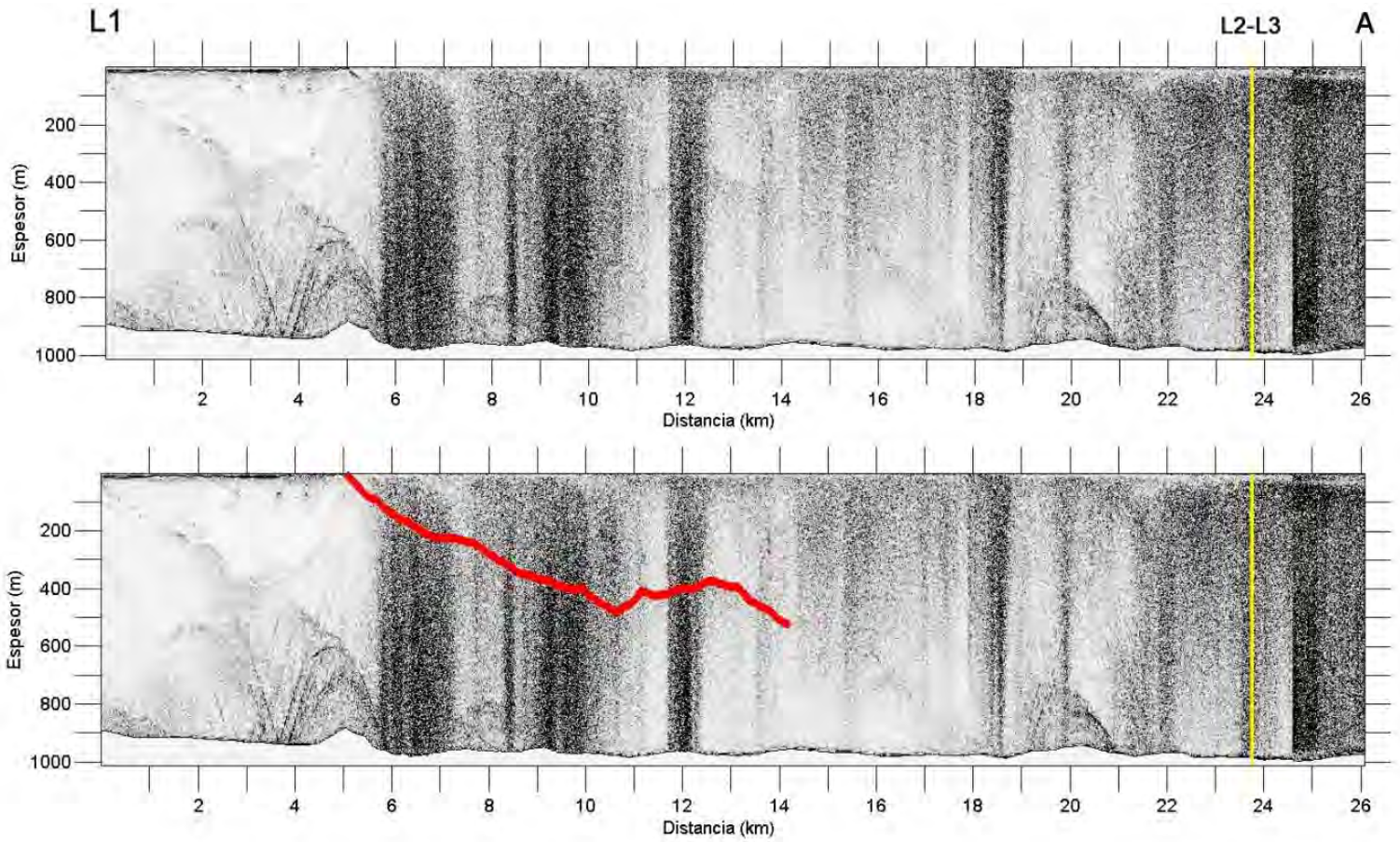


Figura 6.10 Perfil longitudinal L1-L43: radargrama correspondientes a las dos primeras divisiones del perfil (L1-A y A-B) de datos originales (imagen superior) y radargramas con representación vectorial en rojo (imagen inferior).

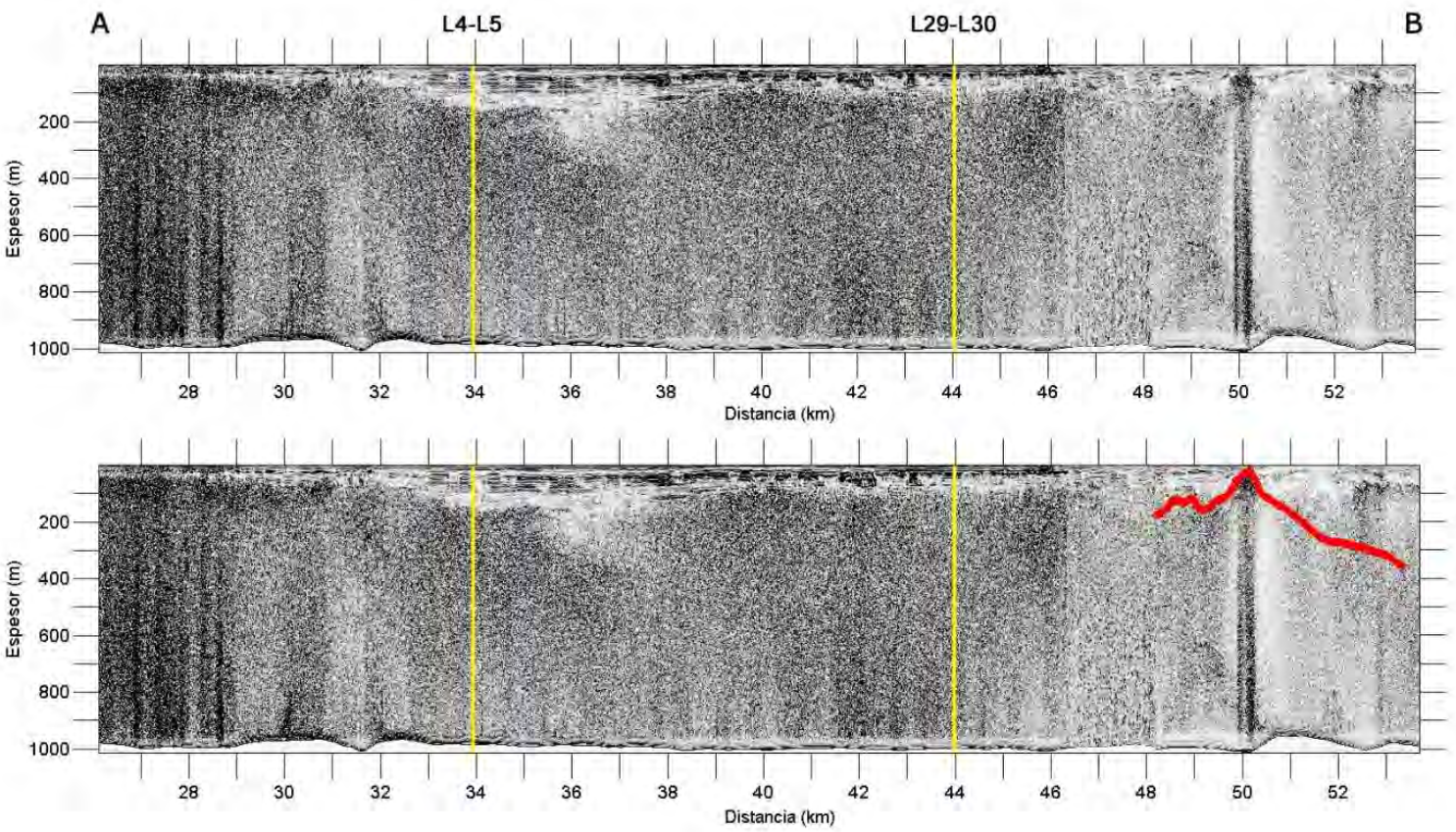


Figura 6.11 Perfil longitudinal L1-L43: radargrama correspondientes a las dos primeras divisiones del perfil (L1-A y A-B) de datos originales (imagen superior) y radargramas con representación vectorial en rojo (imagen inferior).

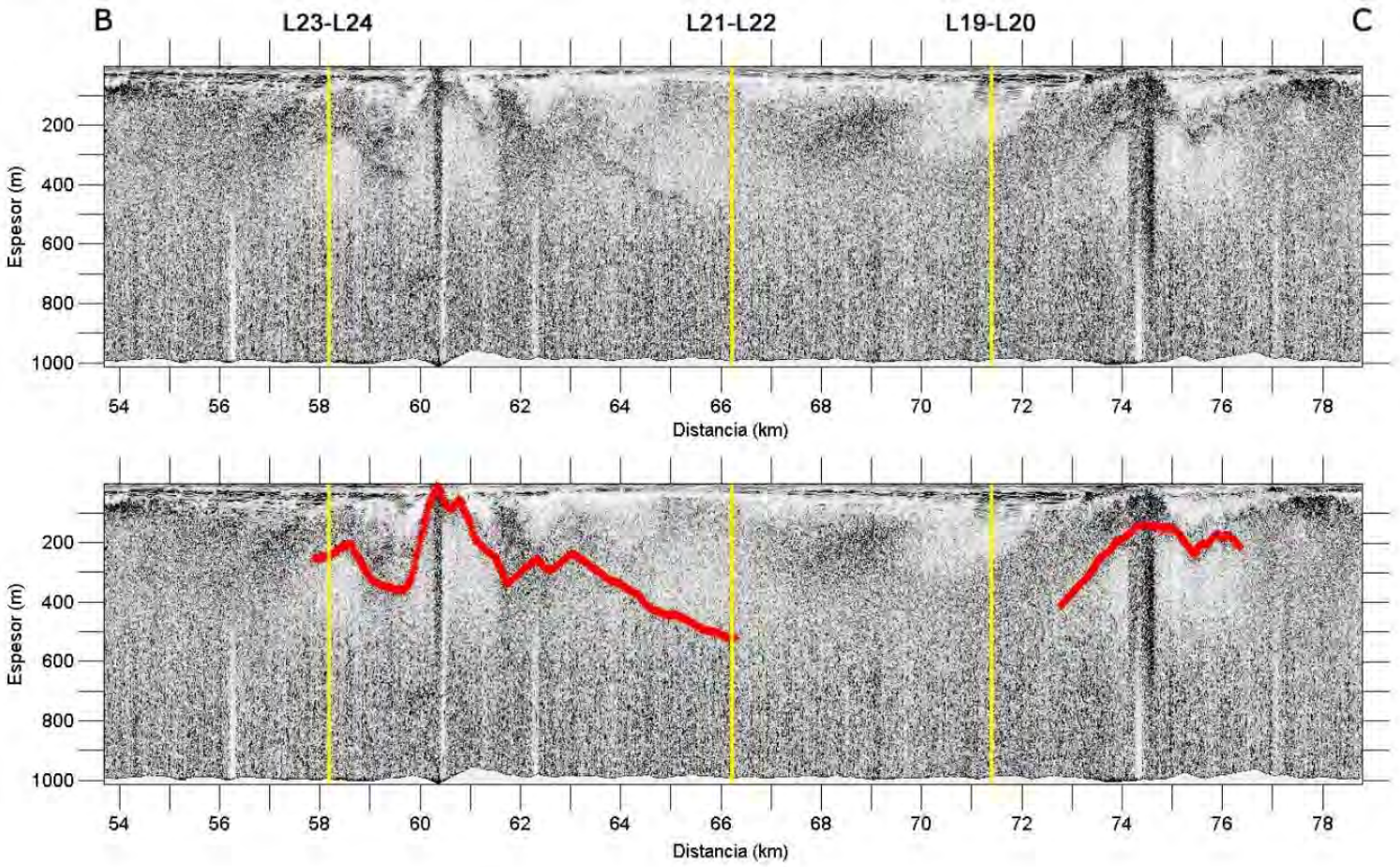


Figura 6.12 Perfil longitudinal L1-L43: radargrama correspondientes a las dos primeras divisiones del perfil (L1-A y A-B) de datos originales (imagen superior) y radargramas con representación vectorial en rojo (imagen inferior).

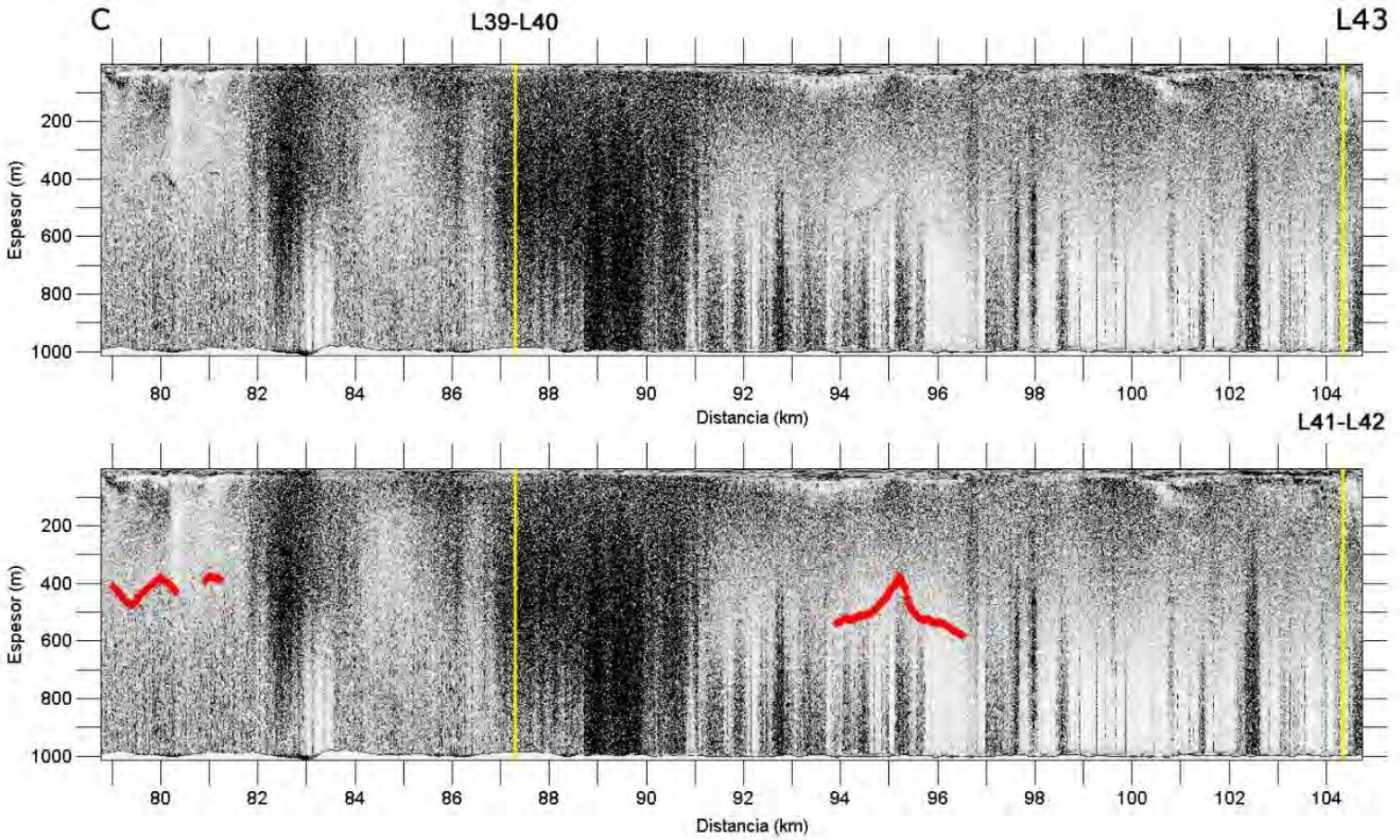


Figura 6.13 Perfil longitudinal L1-L43: radargrama correspondientes a la tercer y cuerta divisiones del perfil (B-C y C-L43) de datos originales (imagen superior) y radargramas con representación vectorial en rojo (imagen inferior).

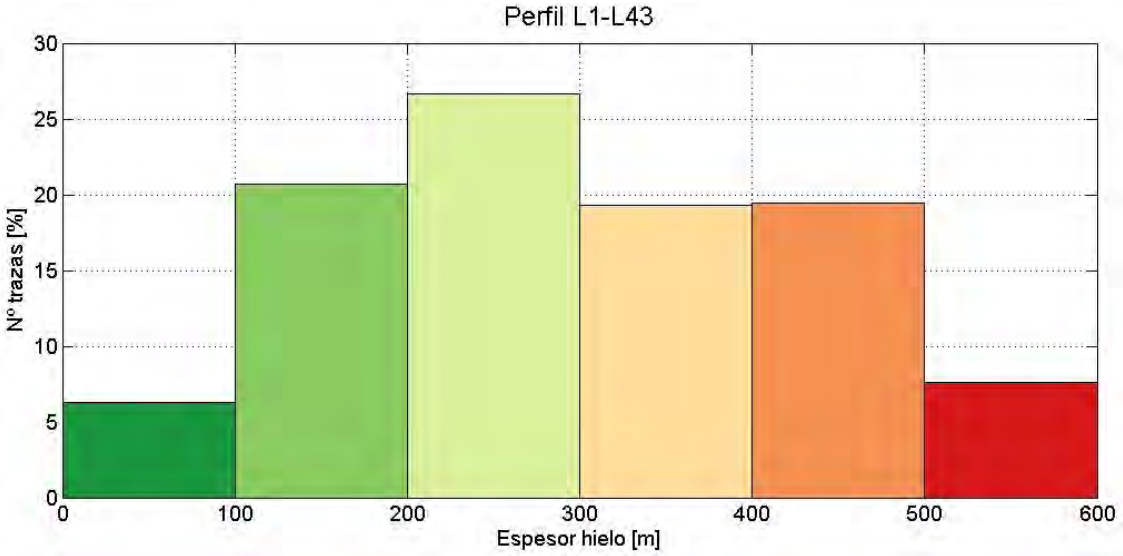


Figura 6.14 Histograma del espesor de hielo en el perfil L1-L43.

6.5.2.2 Perfil transversal L2-L3

La Figura 6.15 muestra el radargrama correspondiente al perfil transversal L2-L3. La línea vertical corresponde a la intersección con el perfil longitudinal L1-L43. La imagen inferior muestra la interpretación del fondo rocoso con una línea roja. El espesor máximo detectado es de 510 m y un espesor mínimo de 20 m, con un espesor promedio de 221 m y una desviación estándar de 108 m. Las zonas sin interpretación del fondo rocoso corresponden a zonas con grietas en superficie, excesiva dispersión de señal por hielo temperado o con espesores superiores al máximo detectable. La distancia total de este perfil es de 16 km.

La Figura 6.16 muestra la distribución del espesor de hielo a lo largo del perfil transversal L2-L3. Se observa que la mayor cantidad de datos interpretados se concentra entre 200 y 300 m de espesor.

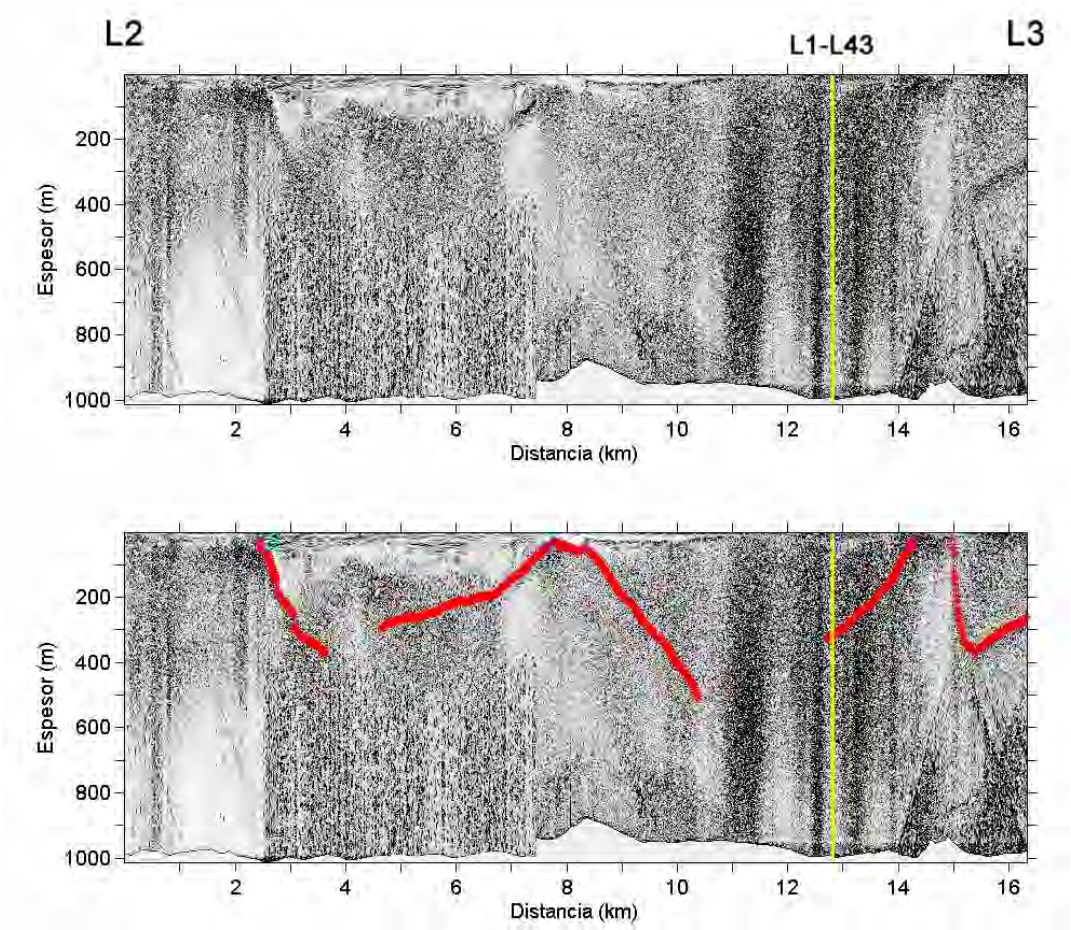


Figura 6.15 Perfil transversal L2-L3: radargrama de datos originales (imagen superior) y radargrama con representación vectorial (imagen inferior).

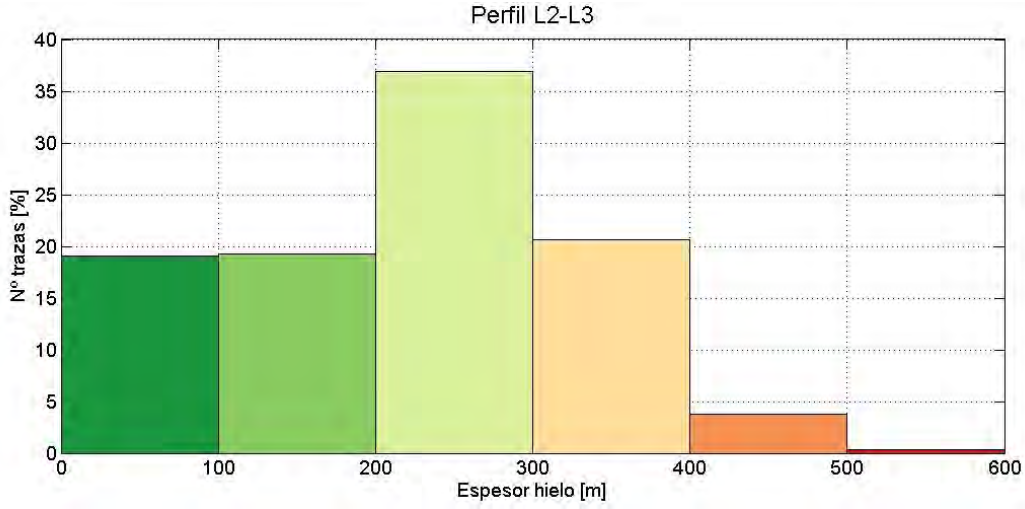


Figura 6.16 Histograma del espesor de hielo en el perfil L2-L3.

6.5.2.3 Perfil transversal L4-L5

La Figura 6.17 y Figura 6.18 la muestran el radargrama correspondiente al perfil transversal L4-L5. Para su mejor visualización, el radargrama se dividió en dos imágenes, de L4 al punto D y del punto D a L5 como se muestra en la Figura 6.8. La línea vertical corresponde a la intersección con el perfil longitudinal L1-L43. La imagen inferior muestra la interpretación del fondo rocoso con una línea roja. El espesor máximo detectado es de 429 m y el espesor mínimo de 10 m, con un espesor promedio de 126 m y una desviación estándar de 94 m. Las zonas sin interpretación del fondo rocoso corresponden a zonas con grietas en superficie, excesiva dispersión de señal por hielo temperado o con espesores superiores al máximo detectable. La distancia total de este perfil es de 52 km.

La muestra Figura 6.19 la distribución del espesor de hielo a lo largo del perfil transversal L4-L5. Se observa que la mayor cantidad de datos interpretados se concentra en los primeros 100 m.

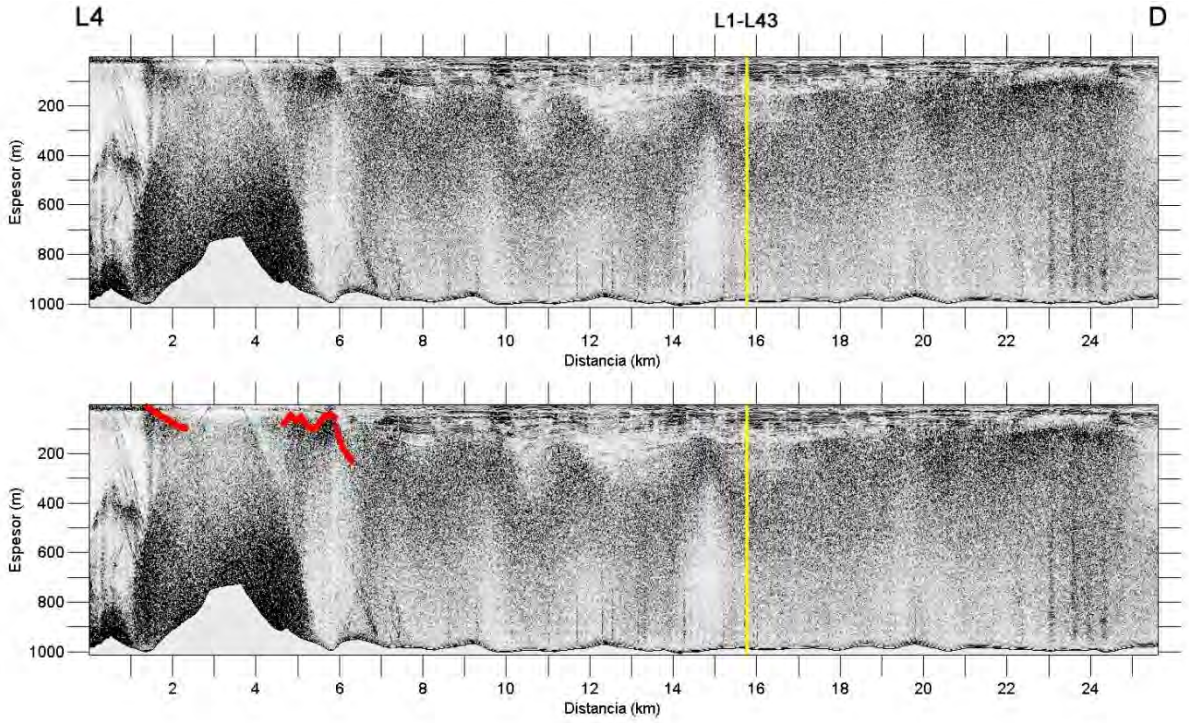


Figura 6.17 Perfil transversal L4-L5: radargrama dividido en L4-D y D-L5 de datos originales (imagen superior) y radargrama con representación vectorial (imagen inferior).

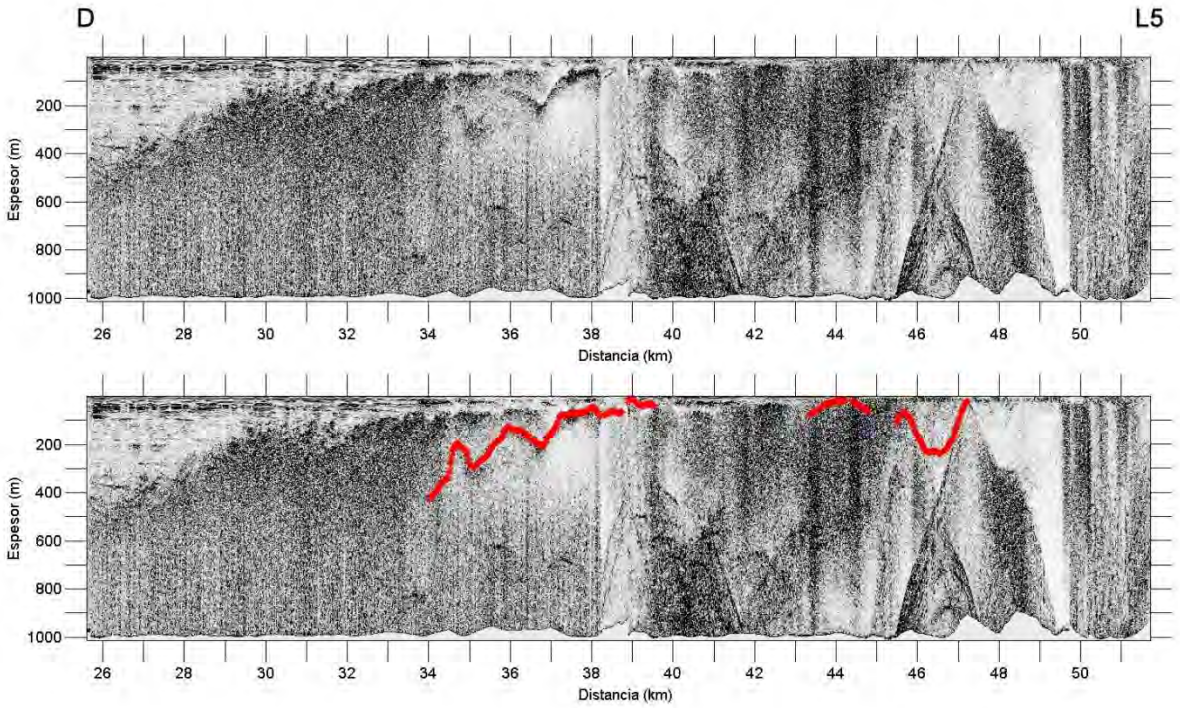


Figura 6.18 Perfil transversal L4-L5: radargrama dividido en L4-D y D-L5 de datos originales (imagen superior) y radargrama con representación vectorial (imagen inferior).

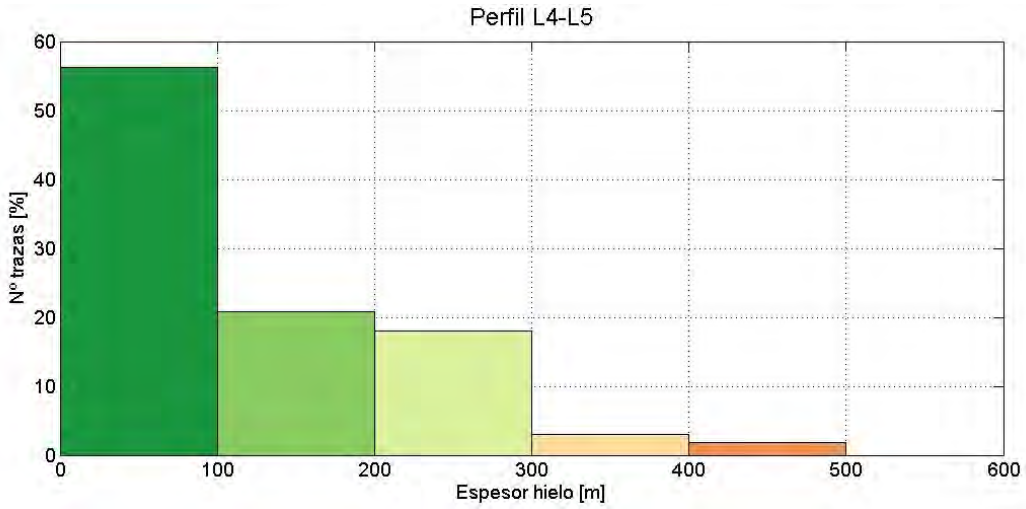


Figura 6.19 Histograma del espesor de hielo en el perfil L4-L5.

6.5.2.4 Perfil transversal L19-L20

La Figura 6.20 y la Figura 6.21 muestran el radargrama correspondiente al perfil transversal L19-L20. Para su mejor visualización el radargrama se dividió en dos imágenes, de L19 al punto E y del punto E a L20 como se muestra en la Figura 6.8. Las líneas verticales corresponden a la intersección con los perfiles longitudinales L56-L57 y L1-L43. La imagen inferior muestra la interpretación del fondo rocoso con una línea roja. El espesor máximo detectado es de 437 m, el espesor mínimo es de 10 m, con un espesor promedio de 178 m y una desviación estándar de 93 m. Las zonas sin interpretación del fondo rocoso corresponden a zonas con grietas en superficie, excesiva dispersión de señal por hielo temperado o con espesores superiores al máximo detectable. La distancia total de este perfil es de 60 km.

La Figura 6.22 muestra la distribución del espesor de hielo a lo largo del perfil transversal L19-L20. Se observa que la mayor cantidad de datos interpretados se concentra entre los 100 y 300 m de espesor.

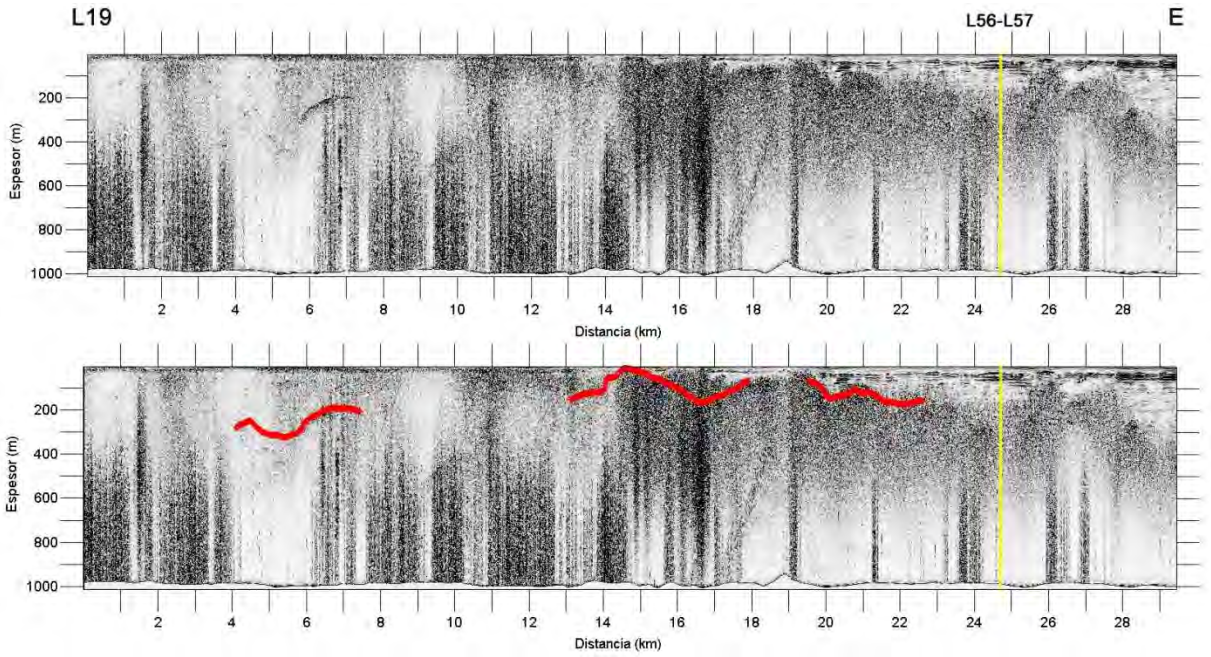


Figura 6.20 Perfil transversal L19-L20: radargrama dividido en L19-E y E-L20 de datos originales (imagen superior) y radargrama con representación vectorial (imagen inferior).

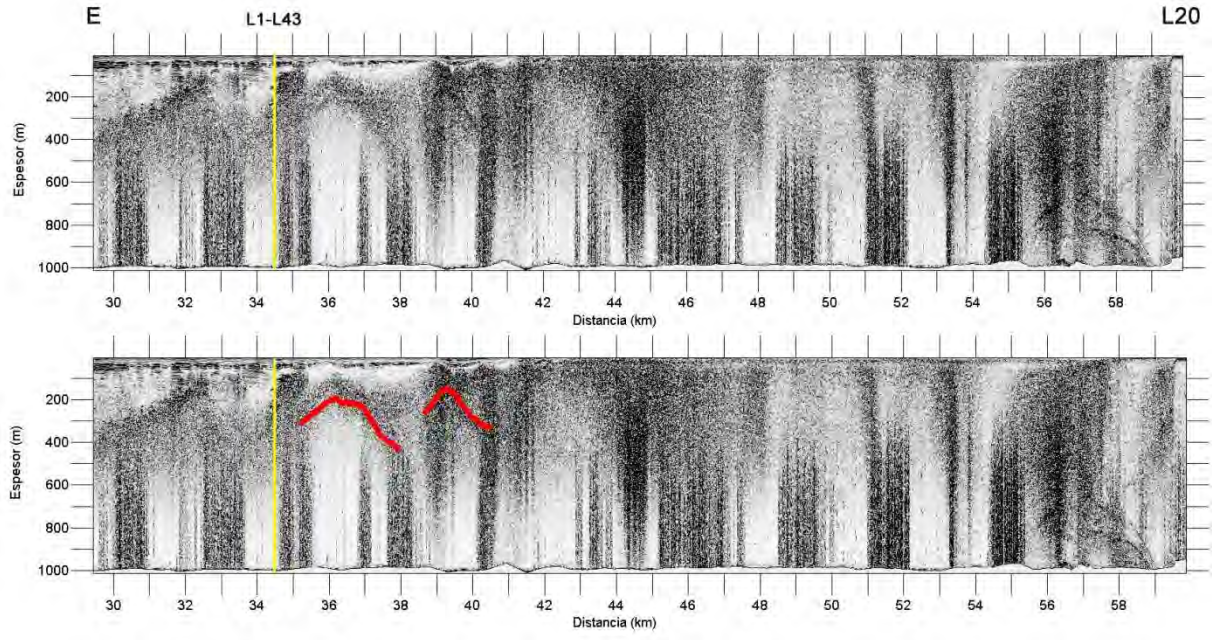


Figura 6.21 Perfil transversal L19-L20: radargrama dividido en L19-E y E-L20 de datos originales (imagen superior) y radargrama con representación vectorial (imagen inferior).

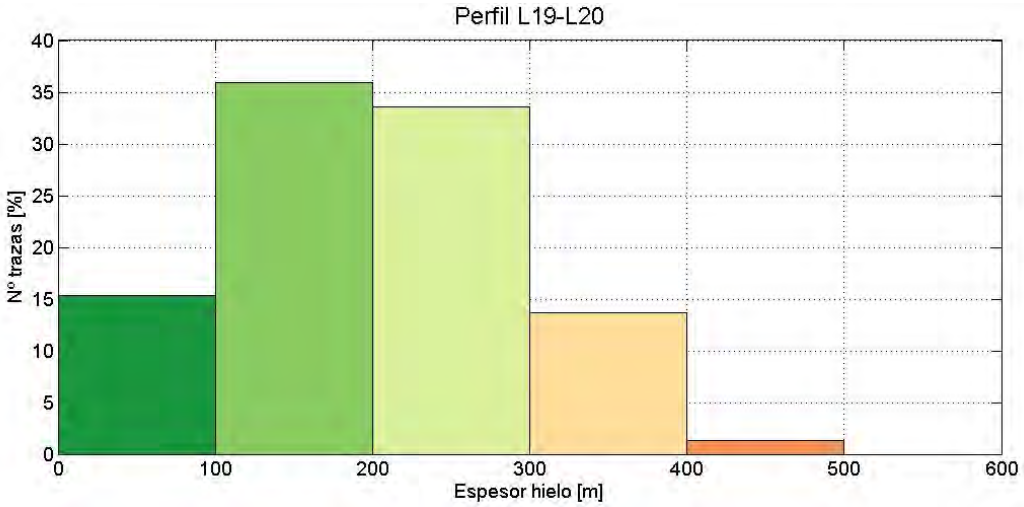


Figura 6.22 Histograma del espesor de hielo en el perfil L19-L20.

6.5.2.5 Perfil transversal L21-L22

La Figura 6.23 y la Figura 6.24 muestran el radargrama correspondiente al perfil transversal L21-L22. Para su mejor visualización el radargrama se dividió en dos imágenes, de L21 al punto F, y del punto F a L22 como se muestra en la Figura 6.8. Las líneas verticales corresponden a la intersección con los perfiles longitudinales L1-L43 y L56-L57. La imagen inferior muestra la interpretación del fondo rocoso con una línea roja. El espesor máximo detectado es de 567 m, el espesor mínimo de 385 m, con un espesor promedio de 469 m y una desviación estándar de 62 m. Las zonas sin interpretación del fondo rocoso corresponden a zonas con grietas en superficie, excesiva dispersión de señal por hielo temperado o con espesores superiores al máximo detectable. La distancia total de este perfil es de 47 km.

La Figura 6.25 muestra la distribución del espesor de hielo a lo largo del perfil transversal L21-L22. Se observa que la mayor cantidad de datos interpretados se concentra entre los 400 y 600 m de espesor.

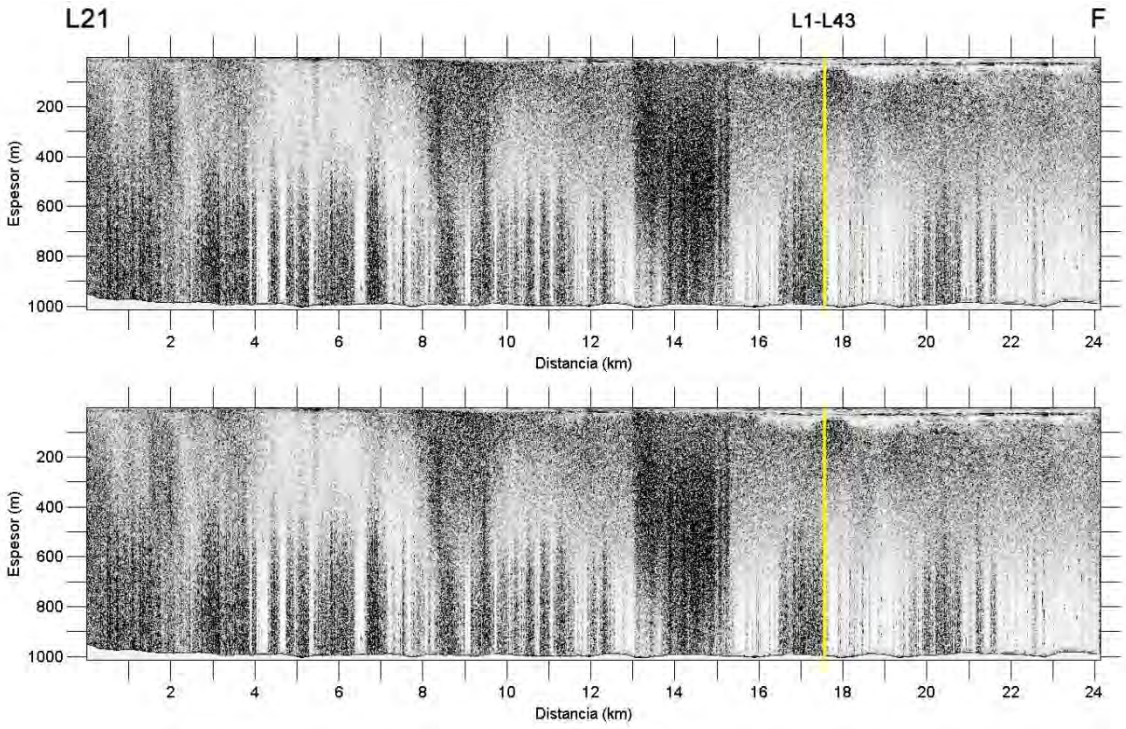


Figura 6.23 Perfil transversal L21-L22: radargrama dividido en L21-F y F-L22 de datos originales (imagen superior) y radargrama con representación vectorial (imagen inferior).

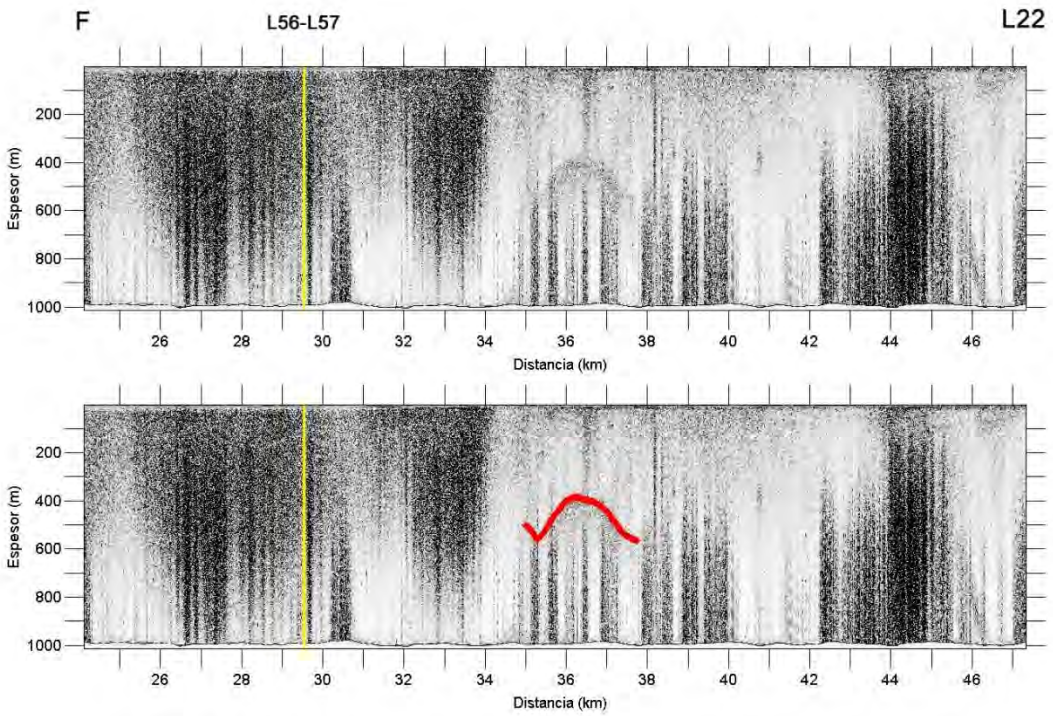


Figura 6.24 Perfil transversal L21-L22: radargrama dividido en L21-F y F-L22 de datos originales (imagen superior) y radargrama con representación vectorial (imagen inferior).

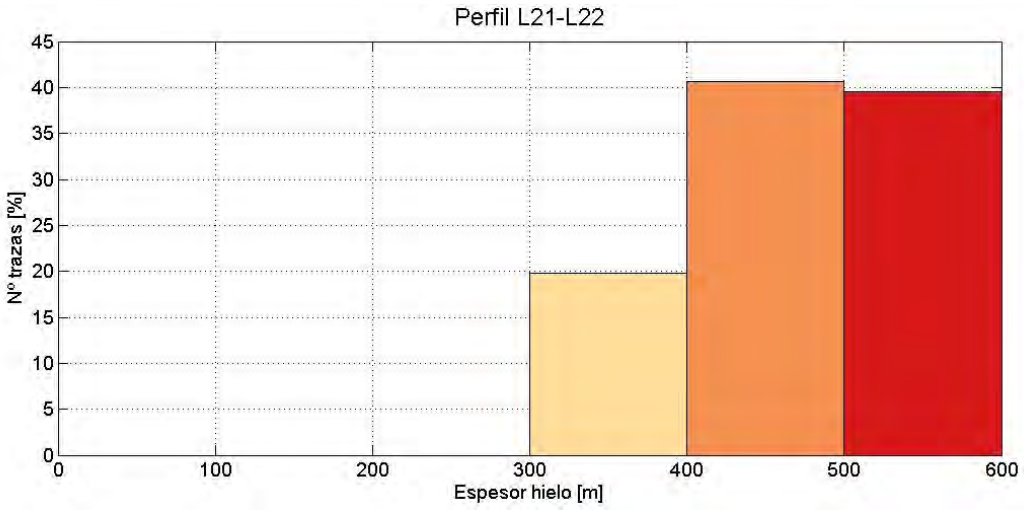


Figura 6.25 Histograma del espesor de hielo en el perfil L21-22.

6.5.2.6 Perfil transversal L23-L24

La Figura 6.26 muestra el radargrama correspondiente al perfil transversal L23-L24. Las líneas verticales corresponden a la intersección con los perfiles longitudinales L56-L57 y L1-L43. La imagen inferior muestra la interpretación del fondo rocoso con una línea roja. El espesor máximo detectado es de 359 m, el espesor mínimo de 15 m, con un espesor promedio de 181 m y una desviación estándar de 94 m. Las zonas sin interpretación del fondo rocoso corresponden a zonas con grietas en superficie, excesiva dispersión de señal por hielo temperado o con espesores superiores al máximo detectable. La distancia total de este perfil es de 30 km.

La Figura 6.27 muestra la distribución del espesor de hielo a lo largo del perfil transversal L23-L24. Se observa que la mayor cantidad de datos interpretados se concentra entre los 100 y 300 m de espesor.

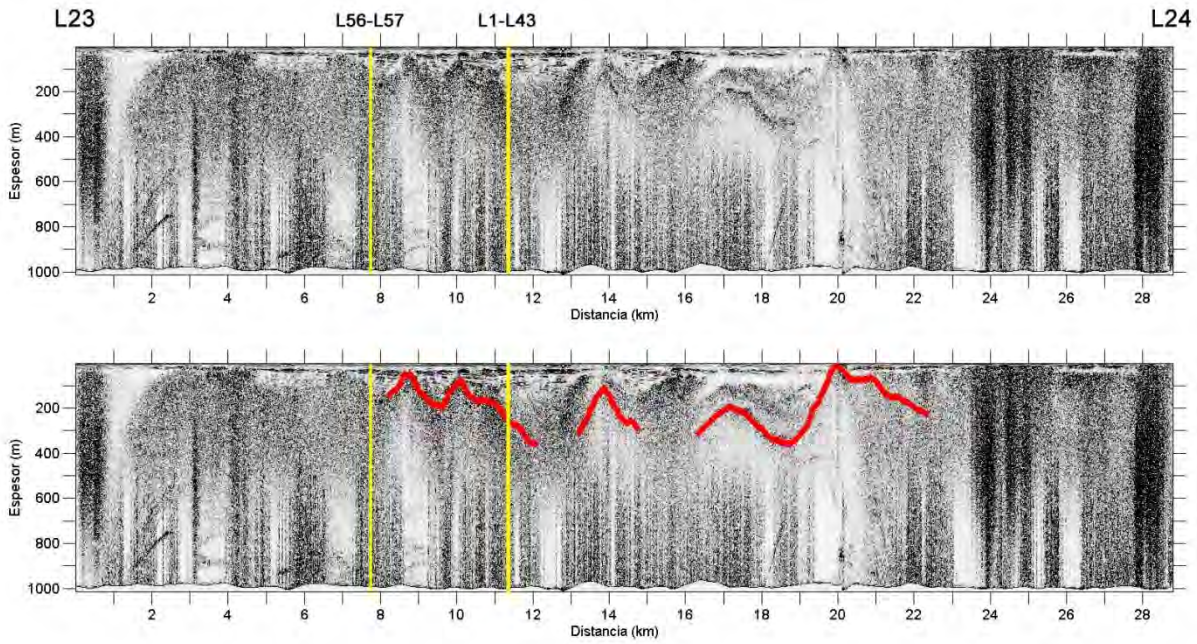


Figura 6.26 Perfil transversal L23-L24: radargrama de datos originales (imagen superior) y radargrama con representación vectorial (imagen inferior).

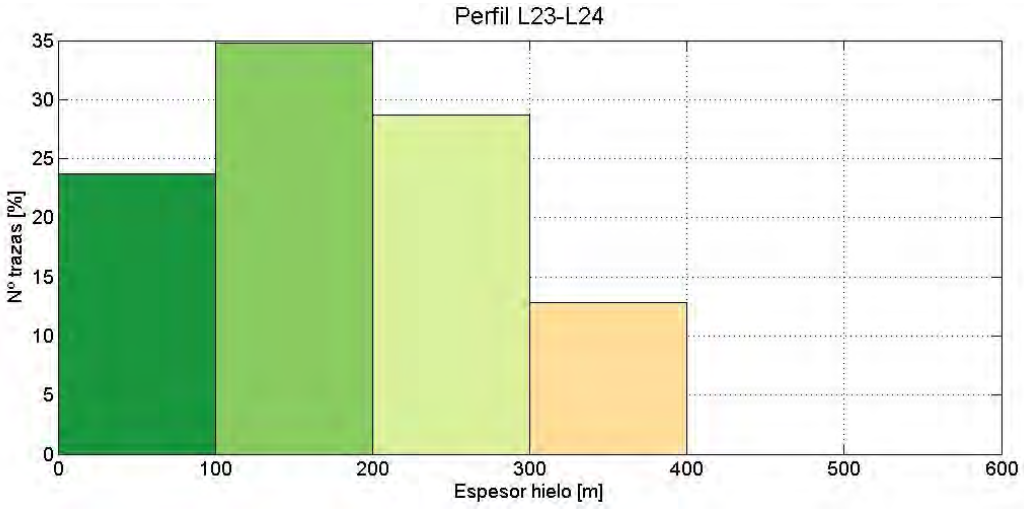


Figura 6.27 Histograma del espesor de hielo en el perfil L23-L24.

6.5.2.7 Perfil transversal L29-L30

La Figura 6.28 muestra el radargrama correspondiente al perfil transversal L29-L30. La línea vertical corresponde a la intersección con el perfil longitudinal L1-L43. La imagen inferior muestra la interpretación del fondo rocoso con una línea roja. El espesor máximo detectado es de 400 m, el espesor mínimo de 11 m, con un espesor promedio de 202 m y una desviación estándar de 91 m. Las zonas sin interpretación del fondo rocoso corresponden a zonas con grietas en superficie, excesiva dispersión de señal por hielo temperado o con espesores superiores al máximo detectable. La distancia total de este perfil es de 29 km.

La Figura 6.29 muestra la distribución del espesor de hielo a lo largo del perfil transversal L29-L30. Se observa que la mayor cantidad de datos interpretados se concentra entre los 100 y 300 m de espesor.

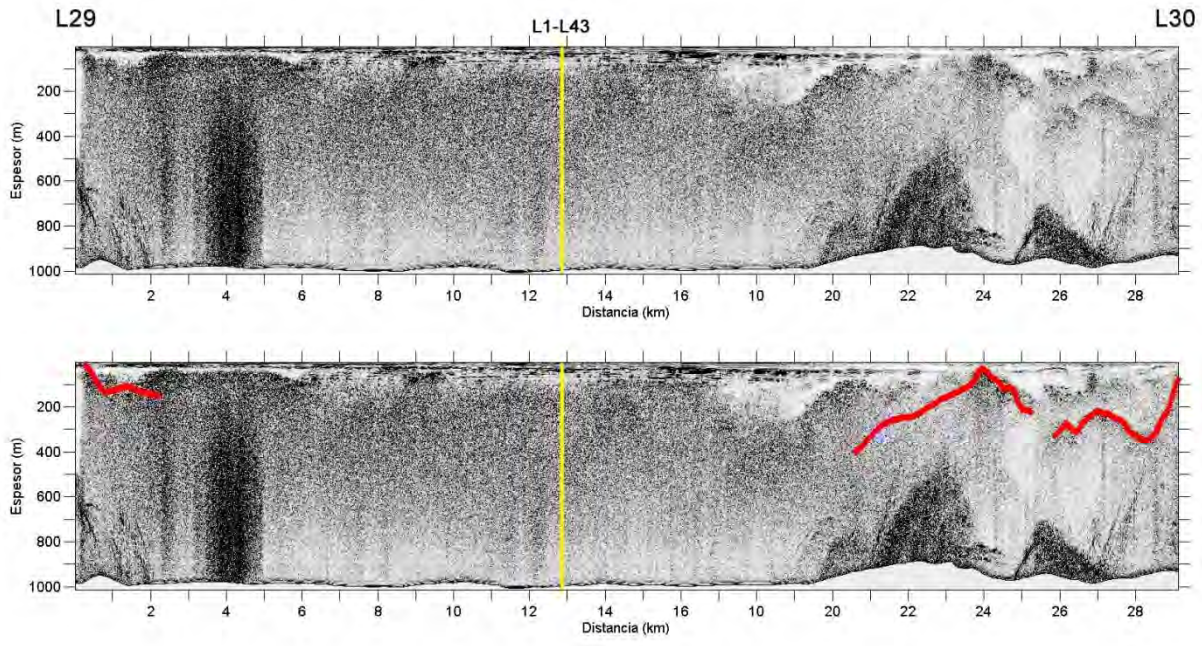


Figura 6.28 Perfil transversal L29-L30: radargrama de datos originales (imagen superior) y radargrama con representación vectorial (imagen inferior).

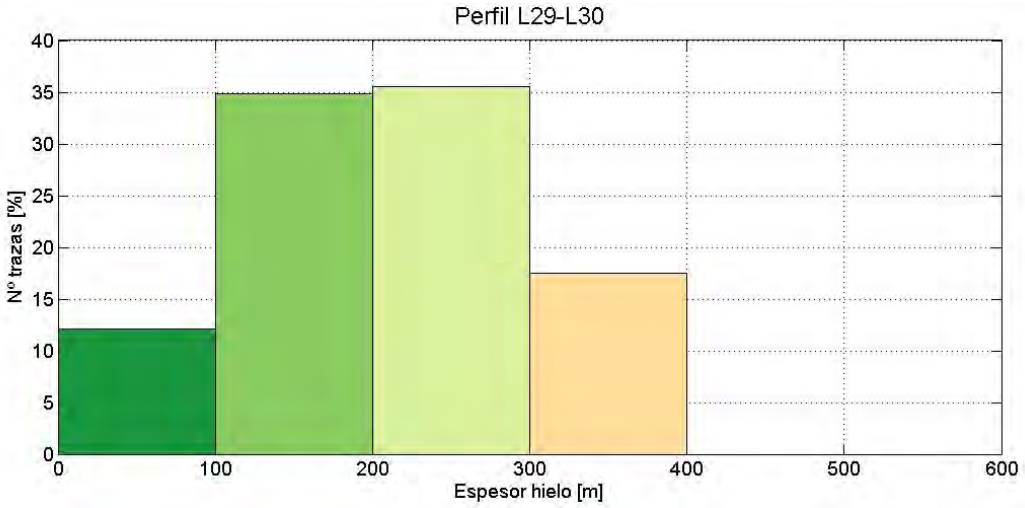


Figura 6.29 Histograma del espesor de hielo en el perfil L29-L30.

6.5.2.8 Perfil transversal L36-L38

La Figura 6.30 muestra el radargrama correspondiente al perfil transversal L36-L38. La línea vertical corresponde a la intersección con el perfil transversal L23-L24. La imagen inferior muestra la interpretación del fondo rocoso con una línea roja. El espesor máximo detectado es de 368 m, el espesor mínimo de 12 m, con un espesor promedio de 109 m y una desviación estándar de 96 m. Las zonas sin interpretación del fondo rocoso corresponden a zonas con grietas en superficie, excesiva dispersión de señal por hielo temperado o con espesores superiores al máximo detectable. La distancia total de este perfil es de 18 km.

La Figura 6.31 muestra la distribución del espesor de hielo a lo largo del perfil transversal L36-L38. Se observa que la mayor cantidad de datos interpretados se concentra en los primeros 100 m de espesor.

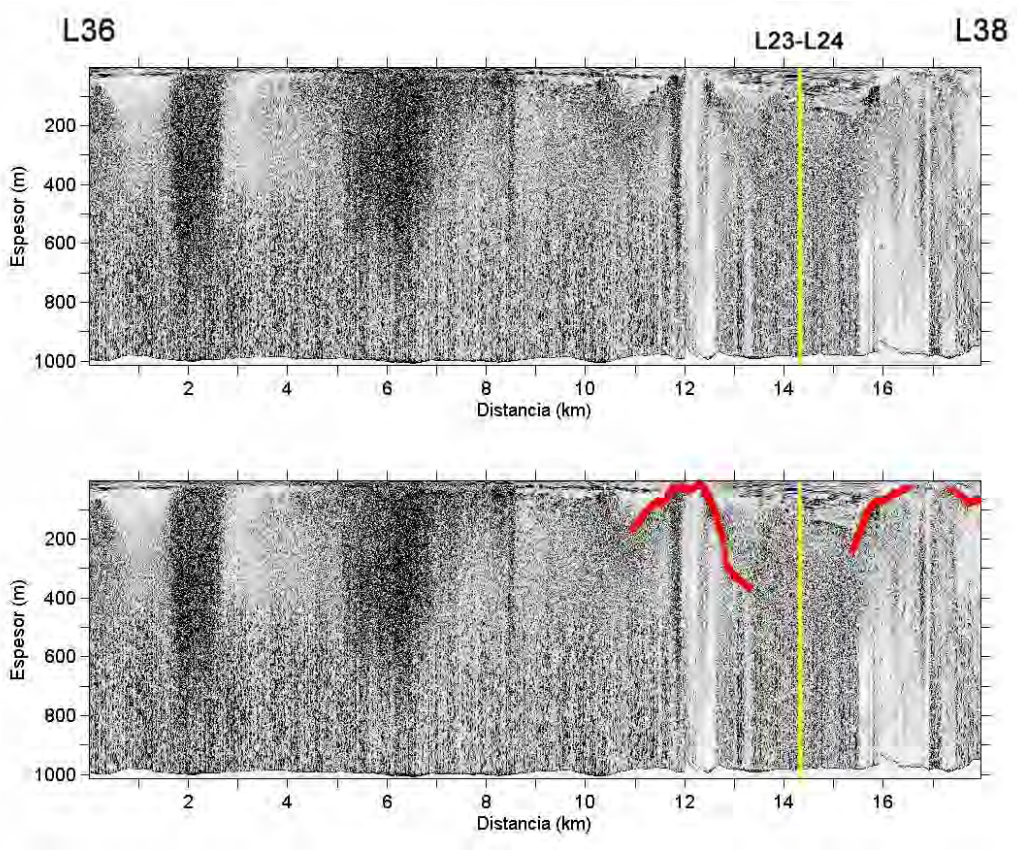


Figura 6.30 Perfil transversal L36-L38 radargrama de datos originales (imagen superior) y radargrama con representación vectorial (imagen inferior).

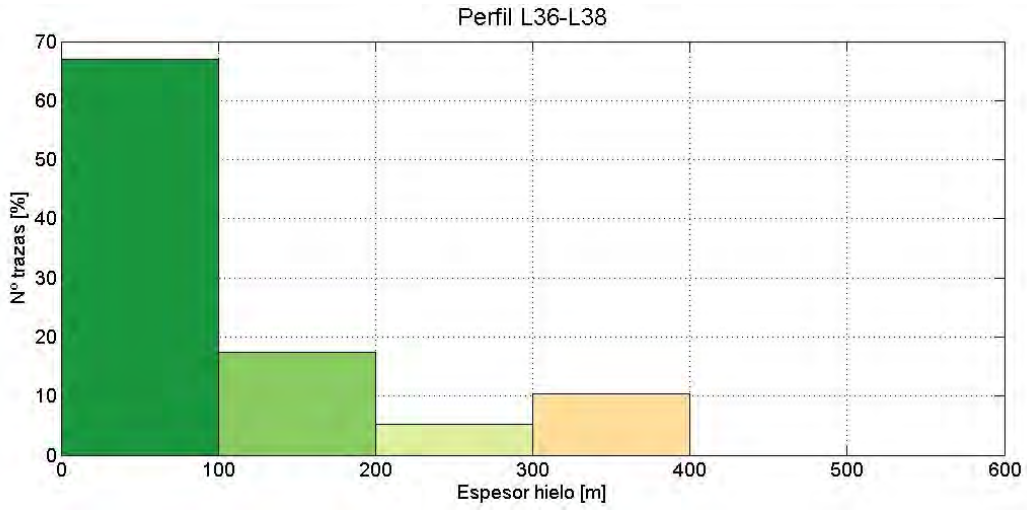


Figura 6.31 Histograma del espesor de hielo en el perfil L36-L38.

6.5.2.9 Perfil transversal L39-L40

La Figura 6.32 muestra el radargrama correspondiente al perfil transversal L39-L40. La línea vertical corresponde a la intersección con el perfil longitudinal L1-L43. La imagen inferior muestra la interpretación del fondo rocoso con una línea roja. El espesor máximo detectado es de 373 m, el espesor mínimo de 10 m, con un espesor promedio de 174 m y una desviación estándar de 122 m. Las zonas sin interpretación del fondo rocoso corresponden a zonas con grietas en superficie, excesiva dispersión de señal por hielo temperado o con espesores superiores al máximo detectable. La distancia total de este perfil es de 9 km.

La Figura 6.33 muestra la distribución del espesor de hielo a lo largo del perfil transversal L39-L40. Se observa que la mayor cantidad de datos interpretados se concentra en los primeros 200 m de espesor.

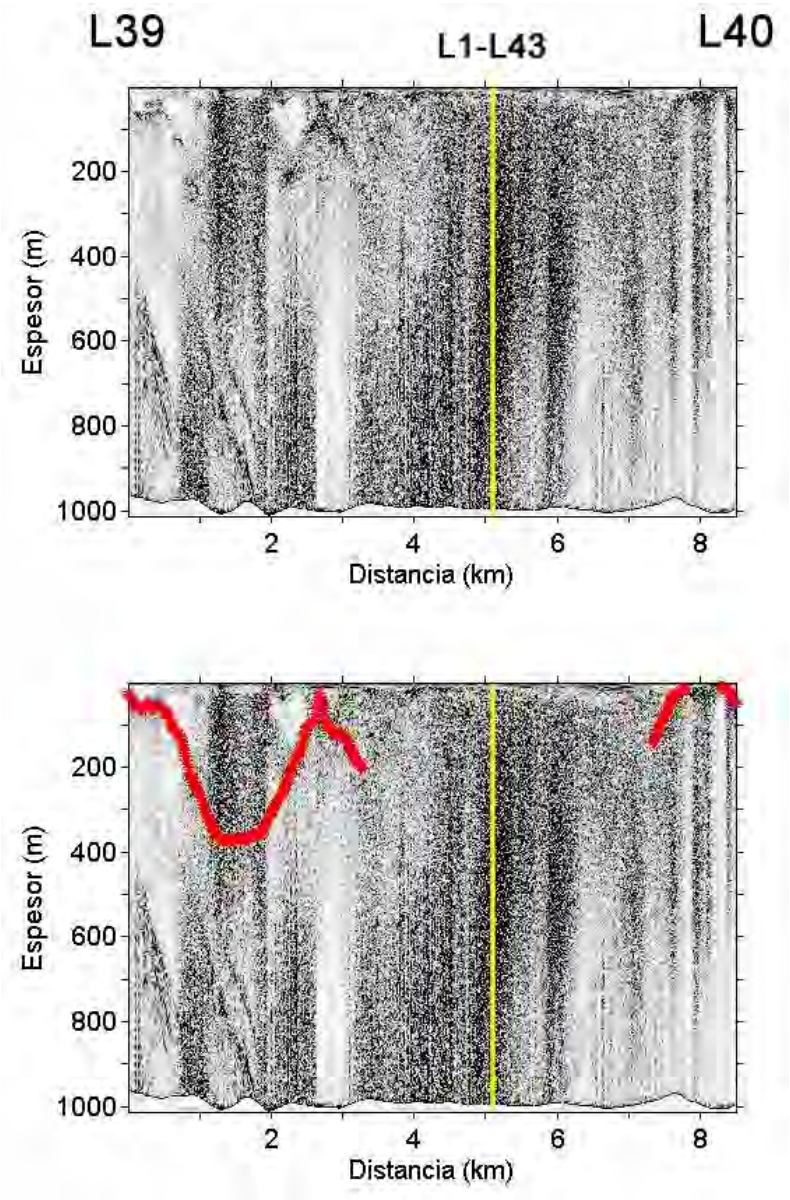


Figura 6.32 Perfil transversal L39-L40: radargrama de datos originales (imagen superior) y radargrama con representación vectorial (imagen inferior).

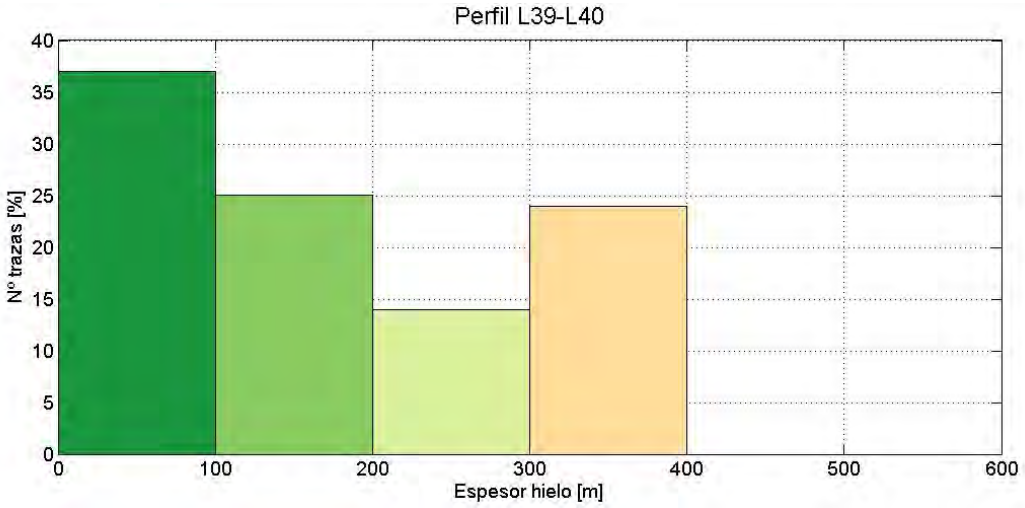


Figura 6.33 Histograma del espesor de hielo en el perfil L39-L40.

6.5.2.10 Perfil transversal L41-L42

La Figura 6.34 muestra el radargrama correspondiente al perfil transversal L41-L42. La línea vertical corresponde a la intersección con el perfil longitudinal L1-L43. La imagen inferior muestra la interpretación del fondo rocoso con una línea roja. El espesor máximo detectado es de 501 m, el espesor mínimo de 71 m, con un espesor promedio de 290 m y una desviación estándar de 119 m. Las zonas sin interpretación del fondo rocoso corresponden a zonas con grietas en superficie, excesiva dispersión de señal por hielo temperado o con espesores superiores al máximo detectable. La distancia total de este perfil es de 16 km.

La Figura 6.35 muestra la distribución del espesor de hielo a lo largo del perfil transversal L41-L42. Se observa que la mayor cantidad de datos interpretados se concentra entre 300 y 400 m de espesor.

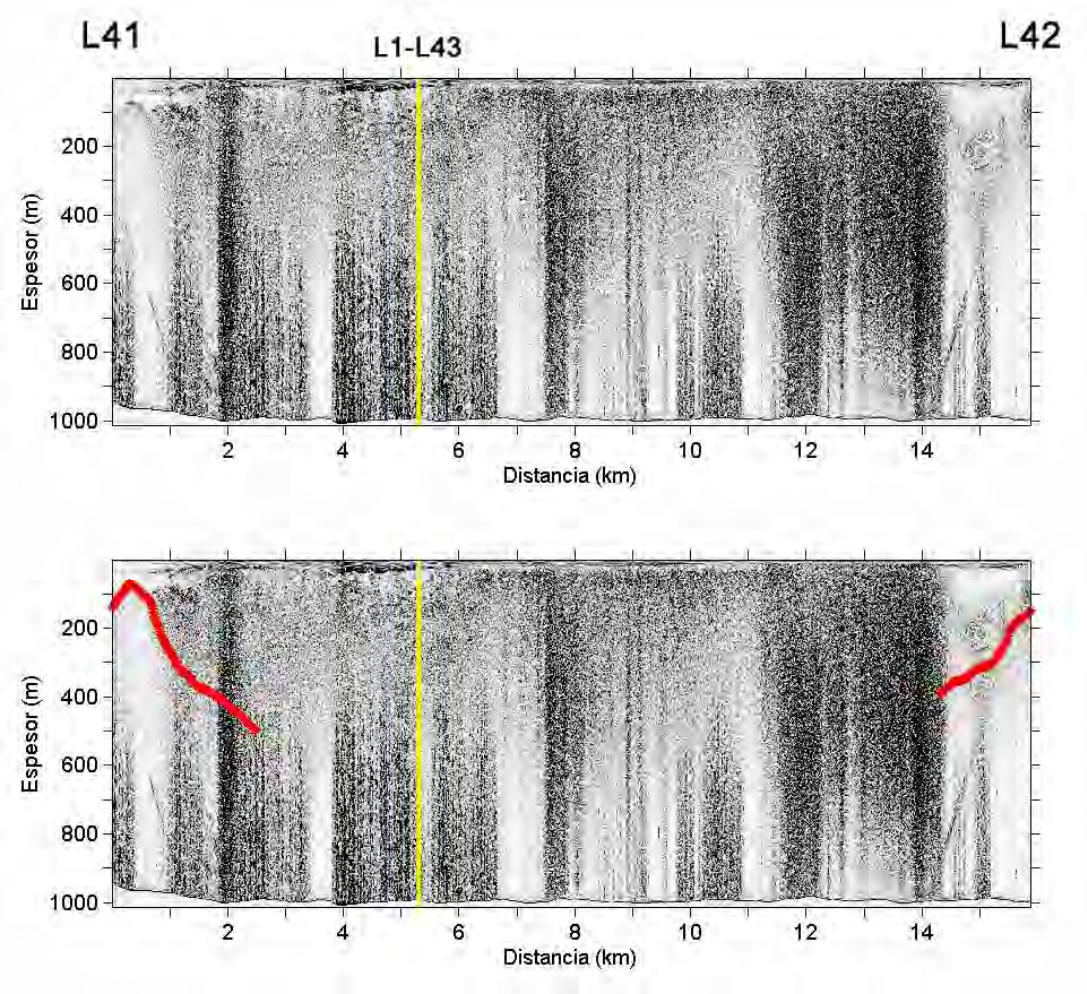


Figura 6.34 Perfil transversal L41-L42: radargrama de datos originales (imagen superior) y radargrama con representación vectorial (imagen inferior).

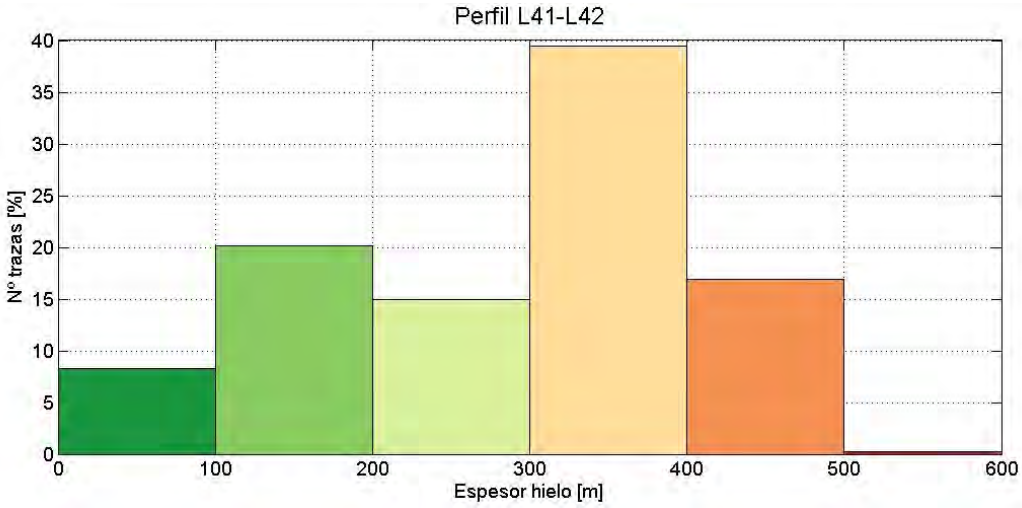


Figura 6.35 Histograma del espesor de hielo en el perfil L41-L42.

6.5.2.11 Perfil longitudinal L56-L57

La Figura 6.36 y la Figura 6.37 muestran el radargrama correspondiente al perfil longitudinal L56-L57. Para su mejor visualización el radargrama se dividió en dos imágenes, de L56 al punto G y del punto G a L57 como se muestra en la Figura 6.8. Las líneas verticales corresponden a la intersección con los perfiles transversales L21-L22 y L19-L20. La imagen inferior muestra la interpretación del fondo rocoso con una línea roja. El espesor máximo detectado es de 470 m, el espesor mínimo de 10 m, con un espesor promedio de 209 m y una desviación estándar de 116 m. Las zonas sin interpretación del fondo rocoso corresponden a zonas con grietas en la superficie, excesiva dispersión de señal por hielo temperado o con espesores superiores al máximo detectado. La distancia total de este perfil es de 58 km.

La Figura 6.38 muestra la distribución del espesor de hielo a lo largo del perfil transversal L56-L57. Se observa que la mayor cantidad de datos interpretados se concentra en los primeros 400 metros de espesor.

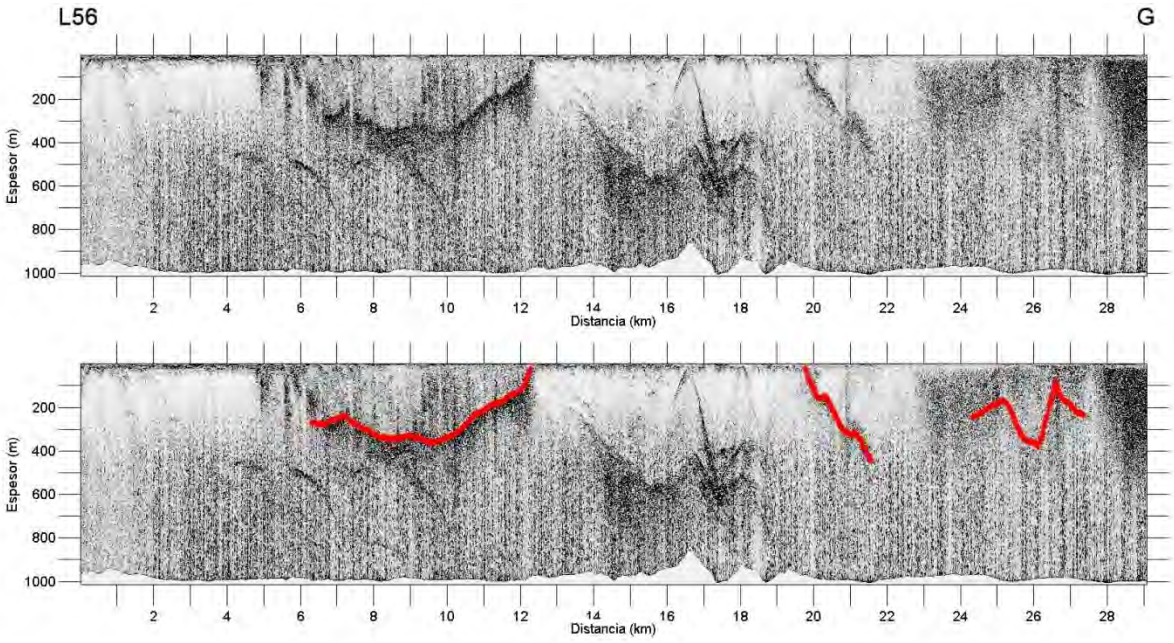


Figura 6.36 Perfil longitudinal L56-G del radargrama L56-L57 de datos originales (imagen superior) y radargrama con representación vectorial (imagen inferior).

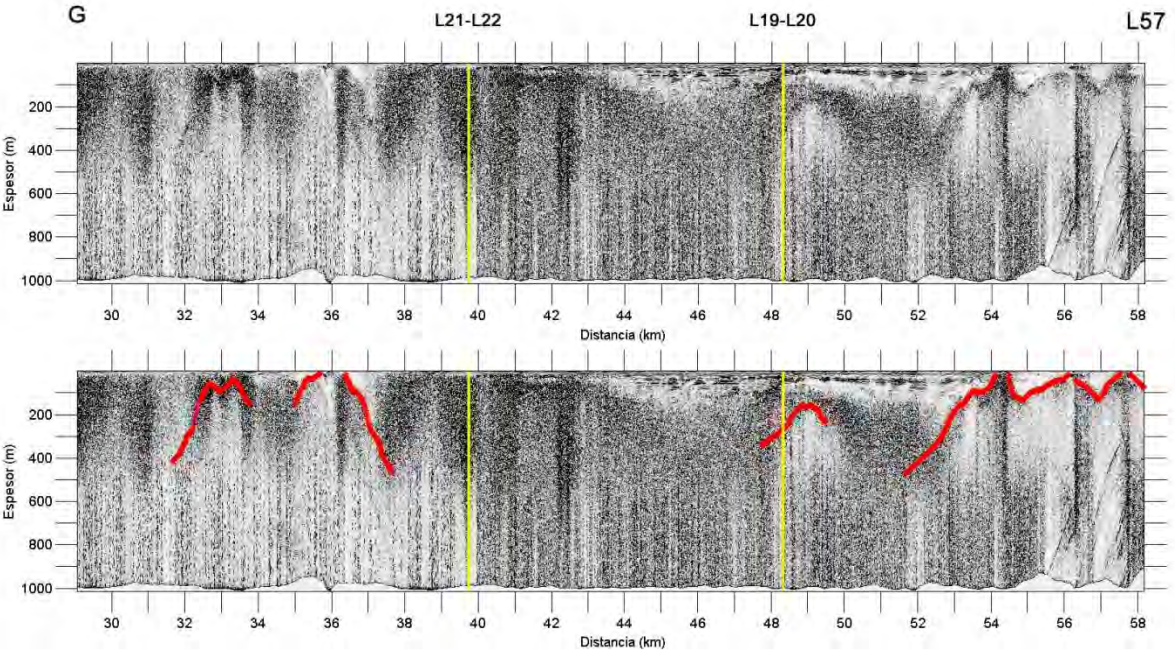


Figura 6.37 Perfil longitudinal G-L57 del radargrama L56-L57 de datos originales (imagen superior) y radargrama con representación vectorial (imagen inferior).

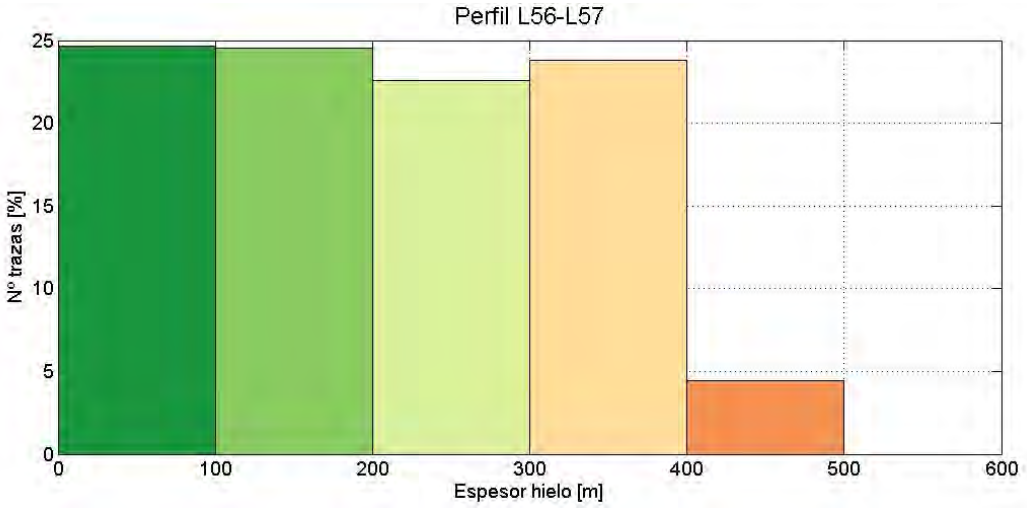


Figura 6.38 Histograma del espesor de hielo en el perfil L56-L57.

6.6 Comparación entre los perfiles analizados

La Tabla 6.3 muestra un resumen de las mediciones de cada perfil, y su comparación. En esta tabla se detallan: distancia total recorrida (DT), distancia cubierta por datos interpretados de espesor (E. Esp.), espesor mínimo (E. min), espesor máximo (E. máx), espesor promedio (E. prom), desviación estándar (DE), elevación minima (Elev. Min) y elevación máxima (Elev. máx). El espesor máximo registrado entre los perfiles longitudinales y transversales es de 581 m y se encuentra en el perfil logitudinal L1-L43. El perfil medido más largo es la longitudinal L1-L43 con 105 km. El espesor promedio medido en la totalidad de los perfiles es de 219 m con una desviación estándar (DE) de 126 m. La elevación máxima se registró en el perfil transversal L56-L57 y es de 2190 m snm.

Tabla 6.3 Resultados de distancia total recorrida (DT), distancia cubierta por datos interpretados de espesor (E. Esp.), espesores (en m) mínimos (E. mín), máximos (E. máx), promedios (E. prom), desviación estándar (DE), elevaciones mínimas (Elev. mín) y máximas (Elev. máx).

Perfil	DT (km)	E. Esp. (%)	E. mín.	E. máx.	E. prom.	DE	Elev. mín.	Elev. máx.
L1-L43	104.7	31.1%	10	581	287	135	30	1641
L2-L3	16.3	61.1%	20	510	221	108	810	1601
L4-L5	51.7	21.4%	10	429	126	94	574	2125
L19-L20	59.9	31.8%	15	437	197	91	267	1411
L21-L22	47.3	5.9%	385	567	469	62	660	1347
L23-L24	29.9	41.4%	15	359	181	94	1157	1937
L29-L30	29.1	33.9%	11	400	202	91	1320	1933
L36-38	18.0	23.1%	12	368	109	96	1145	1623
L39-L40	8.5	46.9%	10	373	174	122	1494	1726
L41-L42	15.9	25.7%	71	501	290	119	1432	1669
L56-L57	58.2	38.7%	10	470	209	116	23	2190
Total	439.5	30.1%	10	581	219	126	23	2190

6.7 Comparación con datos de otros estudios

Existen estudios previos en CHS donde se han medido espesores de hielo y obtenido la topografía subglacial mediante el uso de radar terrestre [*Rivera and Casassa*, 2002]. Dichas mediciones se realizaron utilizando un radar de frecuencia central 2 MHz en el corredor Hicken, paso Cuatro Glaciares y la zona alta del Glaciar Chico. En dicho estudio, el espesor máximo detectado fue de 700 m aproximadamente y la comparación de los datos obtenidos en este proyecto, muestran valores similares.

Un nuevo estudio acaba de ser publicado con espesores obtenidos con mediciones gravimétricas de alta resolución [*Gourlet et al.*, 2016], los cuales tienen como producto un DEM de la topografía subglacial y un modelo digital de terreno (MDT) de espesor de hielo. Al compararlos con los datos de este proyecto, los valores de espesor de hielo obtenidos de

las mediciones de gravimetría tienden a ser mayores a 1000 m en la meseta, llegando a un máximo aproximado de 1420 m en la zona ubicada entre los perfiles transversales L4-L5 y L29-L30.

Otro estudio disponible es el modelo de *Huss* [*Huss and Farinotti*, 2012], que consiste en estimaciones del espesor de hielo basadas en la inversión de la topografía superficial (específicamente la pendiente y elevación obtenida a partir de SRTM). Este fue aplicado a una gran mayoría de los glaciares incluidos en el *Randolph Glacier Inventory* [*Arendt et al.*, 2012]. Este modelo fue aplicado individualmente para cada cuenca glacial de CHS, y alcanza un máximo de espesor de hielo de 1060 m aproximadamente. Este modelo tiene serias limitaciones en glaciares que comparten divisorias de hielo en mesetas o zonas planas sin límites en roca superficial, sin embargo, resulta interesante en particular porque es más confiable en las cercanías de las líneas de equilibrio de glaciares con lenguas bien definidas.

En la Figura 6.39, se muestran tres perfiles topográficos, donde se comparan los datos correspondientes al lecho rocoso obtenidos mediante datos de radar capturados en la segunda y cuarta campaña del presente proyecto, con datos de gravimetría y de topografía subglacial obtenida por el modelo de *Huss*.

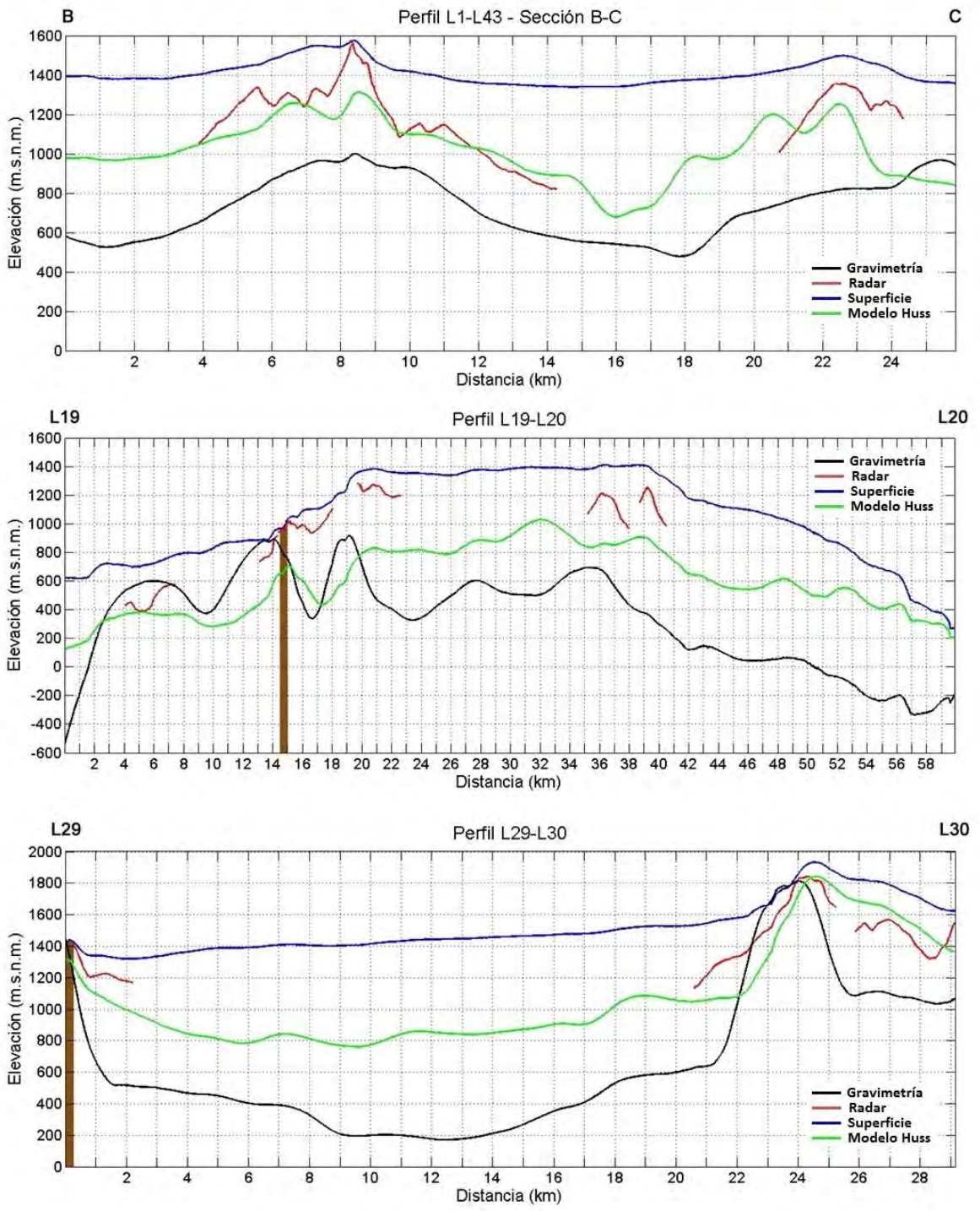


Figura 6.39 Perfiles topográficos de la sección B-C del perfil longitudinal L1-L43 y perfiles transversales L19-L20 y L29-L30. En ellos, se muestra la topografía superficial (azul), lecho rocoso derivado de radar (rojo), lecho rocoso de gravimetría (negro) y lecho rocoso del modelo de *Huss* (verde). La línea café corresponde a afloramientos rocosos visibles en una imagen Landsat 8, del 14 de enero de 2015.

En la sección B-C del perfil longitudinal L1-L43, se observa que los datos de gravimetría y del modelo de *Huss* presentan curvas de topografía subglacial similares, pero con diferencias de varios cientos de metros de profundidad. El modelo de *Huss* es el que se acerca más a los datos de radar presentados en la sección respectiva.

En el perfil transversal L19-L20, se observa que tanto los datos de gravimetría como los del modelo de *Huss* presentan diferencias importantes respecto de los datos de radar obtenidos en este proyecto. A 14 km del punto L19 sin embargo, se observa que tanto los datos gravimétricos como los datos de radar logran resolver bien la elevación superficial, en un sector que corresponde a un afloramiento rocoso (representado con una franja café en la Figura 6.39), no así el modelo de *Huss* que marca una profundidad de más de 250 m en este punto. En el resto del perfil topográfico, no se observan mayores similitudes entre los datos.

En el perfil transversal L29-L30, se observa que tanto las mediciones gravimétricas como el modelo de *Huss* tienden a mostrar diferencias muy fuertes en la meseta, pero se asemejan en las zonas cercanas al afloramiento rocoso del punto L29 y al cambio abrupto de pendiente a 24 km de dicho punto. Esto se observa especialmente en los datos de gravimetría, en donde se presentan caídas abruptas de la topografía subglacial del orden de 1000 m a una distancia de un kilómetro de los puntos referidos anteriormente, llegando a un máximo de 1200 m de espesor a 13 km del punto L29.

Del conjunto de datos en comparación, el modelo de *Huss* es el que tiene datos con órdenes de magnitud más cercanos a los datos de radar obtenidos en el presente proyecto. Se infiere que las diferencias se deben, en el caso del modelo de *Huss*, a una menor resolución de los

datos de origen respecto de los datos de radar y a una suavización de éstos. En el caso de los datos gravimétricos, las diferencias observadas pueden explicarse por la no calibración de los datos con registro de radar y que la cobertura de líneas de vuelo no es la misma que en el caso de los vuelos de radar de este proyecto.

6.7.1 Glaciar Jorge Montt

En la Figura 1-40 se muestra un perfil en el Glaciar Jorge Montt, donde se puede observar la topografía superficial, subglacial y la batimetría del fiordo asociado. La topografía superficial fue obtenida desde los datos de radar aerotransportado de 20 MHz, así como también los datos de espesor de hielo. También se observa en línea verde el espesor estimado mediante el modelo de Huss. De la figura se puede apreciar que la topografía subglacial en el Glaciar Jorge Montt cerca del frente está un poco por encima del nivel del mar, sin embargo a unos 3 km y hasta 6 km del frente actual, la pendiente se invierte y vuelve a quedar bajo el nivel del mar.

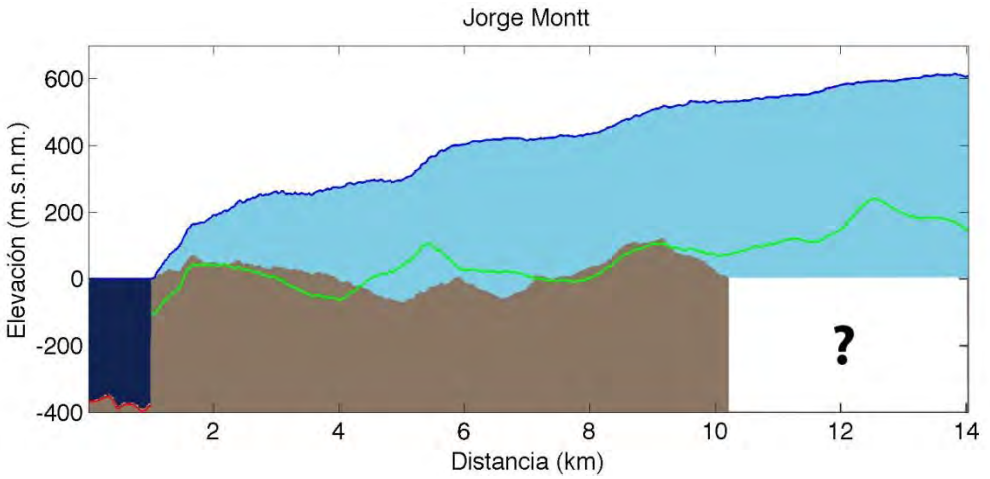


Figura 6.40 Perfil del Glaciar Jorge Montt. Se puede observar la topografía superficial (línea azul), la topografía subglaciar obtenida con el radar aerotrasportado (área café), el espesor obtenido mediante el modelo de Huss (línea verde) y la batimetría (línea roja).

6.7.2 Glaciar O'Higgins

En la Figura 6-41 se muestra un perfil en el Glaciar O'Higgins, donde se puede observar la topografía superficial, subglaciar y batimetría. La topografía superficial fue obtenida desde los datos de radar aerotransportado de 20 MHz. Sin embargo, en este caso el espesor fue obtenido solamente desde la estimación del modelo de Huss, ya que no hay datos interpretados de espesor de hielo en esta zona debido a la alta dispersión de la señal de radar. De la figura se puede apreciar que la topografía subglaciar en el Glaciar O'Higgins es de tipo *directa*, es decir, la topografía subglaciar tiene pendiente positiva aguas arriba del frente actual.

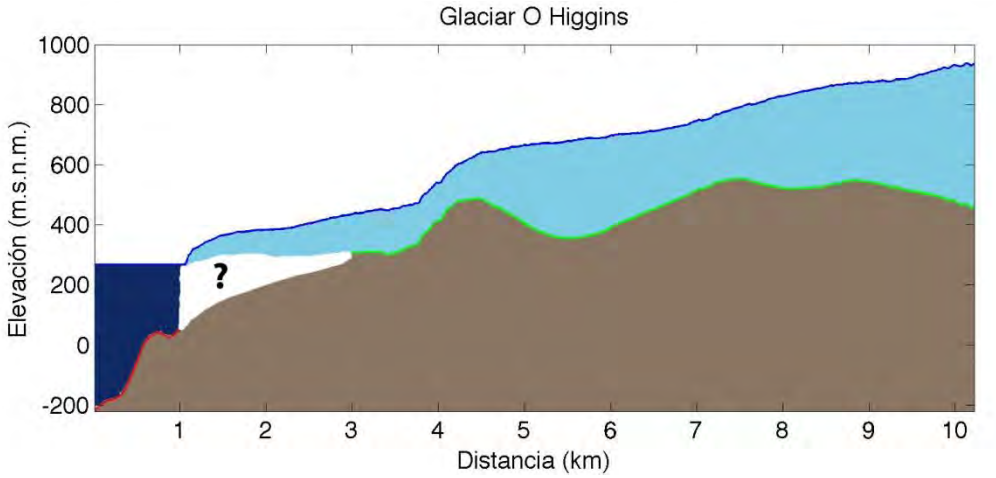


Figura 6.41 Perfil del Glaciar O'Higgins. Se puede observar la topografía superficial (línea azul), la topografía subglacial obtenida mediante el modelo de Huss (línea verde) y la batimetría (línea roja).

6.7.3 Glaciar Témpano

En la Figura 6-42 se muestra un perfil en el Glaciar Témpano, donde se puede observar la topografía superfial, subglaciar y batimetría. La topografía superficial fue obtenida desde los datos LIDAR capturados en este proyecto, y una parte faltante fue completada mediante datos SRTM. El espesor de hielo fue obtenido solamente desde la estimación del modelo de Huss, ya que no hubo líneas de vuelo de radar

planificadas cerca del frente del glaciar. De la figura se puede apreciar que la topografía subglaciar en el Glaciar Témpano es cercana al nivel del mar, sin cambios significativos en los primeros 10 km, dado que siempre se mantiene por sobre el nivel del mar actual.

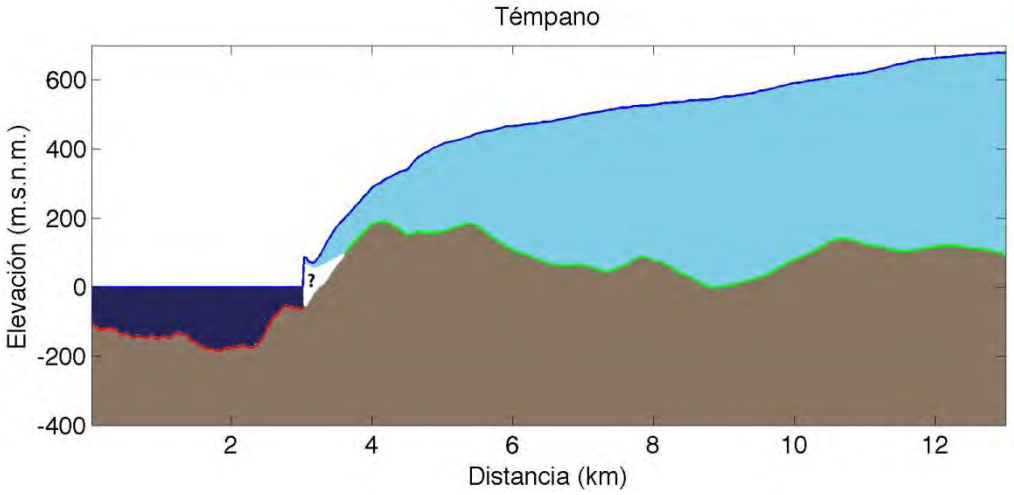


Figura 6.42 Perfil del Glaciar Témpano. Se puede observar la topografía superficial (línea azul), la topografía subglacial obtenida mediante el modelo de Huss (línea verde) y la batimetría (línea roja).

6.8 Discusión y conclusiones

El radar utilizado con una frecuencia central de 20 MHz, resultó ser adecuado para la medición de espesor de hielo en los glaciares de CHS, que son considerados temperados [*Schwikowski et al., 2013*]. De las mediciones realizadas tanto en los perfiles longitudinales como los transversales, se obtuvo un cruce con interpretación del fondo rocoso. Al realizar la comparación de este cruce, se encontró que la diferencia de espesor es de 6 m, que equivale a un 1% del espesor máximo detectado, de 581 m. De acuerdo a lo anterior y considerando que el incremento de traza de los radargramas es 2.5 ns (equivalente a 0.42 m para una velocidad de 0.168 m/ns), la incertidumbre del espesor de hielo es de ± 6 m aproximadamente. Por lo tanto, la precisión obtenida

en las mediciones de los diferentes perfiles del presente proyecto, está en el rango especificado para este tipo de radar.

Se determinó el espesor de hielo, pese a la atenuación y dispersión de la señal electromagnética que impidió detectar el fondo rocoso en el resto de los radargramas. Este efecto se debe a la rugosidad y pendientes del lecho rocoso, a la presencia de cuerpos de agua tanto en la superficie como dentro del glaciar (hielo temperado), y principalmente, a la gran cantidad de grietas.

De la totalidad de los perfiles medidos, el longitudinal L56-L57 registró el retorno de fondo rocoso de mayor potencia reflejada. Como contraste, se pueden mencionar los perfiles transversales L21-L22 y L41-L42, los que producto de las grietas existentes en superficie, se produjo una alta dispersión y atenuación de la señal, lo que imposibilitó la identificación del retorno del fondo rocoso.

Al comparar los datos de radar obtenidos con respecto a otros estudios, se puede decir que los datos medidos en este proyecto se acercan a los obtenidos por el modelo de espesores de hielo de *Huss* [*Huss and Farinotti*, 2012], mientras que están más alejados de los obtenidos por mediciones gravimétricas en la zona de estudio [*Gourlet et al.*, 2016].

De un total de 440.5 km lineales recorridos, 132 km representan la extensión total de datos interpretados de espesor.

En paralelo, se logró determinar la acumulación anual de nieve-neviza mediante el uso de radar de alta frecuencia en la divisoria de los glaciares Greve y O'Higgins, obteniéndose un valor de 0.79 ± 0.1 m de nieve por año.

Por lo tanto se cumplió con el objetivo principal de determinar el espesor de hielo para dos perfiles longitudinales y nueve transversales

mediante el uso de un sistema de radar de baja frecuencia aerotransportado y la estimación de la acumulación de nieve mediante radar de alta frecuencia terrestre. Se comprobó que el método de radio eco sondaje utilizando un radar de impulso de baja frecuencia es el indicado para obtener espesores en hielo temperado con buena precisión, alcanzando máximos cercanos a 600 m.

7 Caracterización del manto nival y estimación de acumulación anual

7.1 Resumen

Se presentan los resultados de las mediciones de acumulación de nieve, derretimiento y balance de masa obtenidos en el CHS en el marco de este proyecto. En el *plateau* del CHS, para el año 2015-2016 se obtuvo un balance de masa anual de 2.8 en la torre nivométrica 1 (1414 m snm) y de 0.2 m eq. a. en la torre nivométrica 2 (1294 m snm). Estos resultados son comparados con trabajos previos, con el fin de estimar una serie de balance de masa para la parte alta del CHS. Gracias al uso de pozos de nieve, torres nivométricas y datos de estratigrafía de nieve con radar, se pudo reconstruir el balance de masa anual para el periodo 2013/12 a 1995/94, cuando se acumuló un total de 6.5 m eq. a., con valores máximos de 0.5 m eq. a en el año 2004/5 y mínimos de 0.2 m eq. a en el año 1998/99. Estos datos se compararon con los balances de masa obtenidos en el testigo de hielo extraído en el glaciar Pío XI a una altura de 2600 m snm, en un sitio mucho más expuesto a precipitación del oeste, por lo que en el periodo común (2001-2005), los valores tienen la misma fluctuación interanual, pero en términos absolutos, los balances difieren en un orden de magnitud. Esto es comprensible porque hay cerca de 1300 m de diferencia altimétrica entre ambos sitios (torres nivométricas y testigo de hielo).

7.2 Introducción

El área de estudio está delimitada hacia el sur por el volcán Lautaro y hacia el norte por el cerro General Gillmore. Está caracterizada por el dominio de las *westerlies,* más fuertes durante el verano al igual que en

gran parte de CHS. Este viento transporta masas de aire húmedo desde el Océano Pacifico hacia el continente, y el efecto de la topografía (cordillera de los Andes) genera un marcado gradiente de precipitaciones E-W, con las mayores precipitaciones registradas en el extremo occidental de CHS.

Para estimar las tasas de acumulación en la zona de estudio, en la campaña realizada en octubre de 2015, se excavaron varios pozos de nieve para medir densidades y se instalaron 3 torres nivométricas: Torre 1 en la estación Greve; Torre 2 a 7 km de la estación Greve; Torre 3 12 km de Greve. En estas torres se instalaron sensores sónicos de altura que fueron utilizados para registrar la variación de la altura desde la base de la torre. Con estos datos, se logró identificar los periodos donde ocurrió precipitación sólida y, también, los eventos ablación de la superficie.

Para extender el análisis en el pasado, y determinar el balance de masa en las últimas décadas, se usaron datos meteorológicos, pozos de nieve y radargramas obtenidos en la zona.

7.3 Objetivos

7.3.1 Objetivo General

Estimar el balance de masa anual y una serie de balance de masa para el *plateau* del CHS.

7.3.2 Objetivos específicos

- Analizar datos de altura de nieve de Torres nivométricas instaladas entre la Estación Greve y la Estación O'Higgins, determinándose la acumulación promedio anual y por periodo.

- Describir y analizar los pozos estratigráficos de nieve realizados en los puntos de instalación de Torres Nivométricas y complementar las estimaciones de acumulación realizadas con las torres nivométricas.
- Comparar datos meteorológicos (Precipitación/humedad y temperatura) de estaciones AWS instaladas en *plateau*/periferia de CHS con los datos derivados de las Torres Nivométricas.
- Analizar capas de acumulación de nieve detectadas mediante el procesamiento de los datos de radar terrestre de 400 MHz obtenidos en la campaña de octubre de 2014, para reconstruir una serie de balance de masa de las últimas décadas.

7.4 Materiales y métodos

7.4.1 Torres Nivométricas

El día 28 de septiembre de 2015 se instaló la primera torre nivométrica (Figura 7.1 y Figura 7.2) en el Glaciar Greve en coordenadas 48°50’1.92’’S, 73°34’51.12’’O, a 1415 m msnm, para lo cual se excavó un pozo de nieve. En el fondo de dicho pozo se usó un taladro para perforar la nieve, lo que permitió instalar una lanza de 3 m de soporte. El extremo superior de la torre quedó finalmente a una altura de 3.2 m sobre la superficie de nieve.

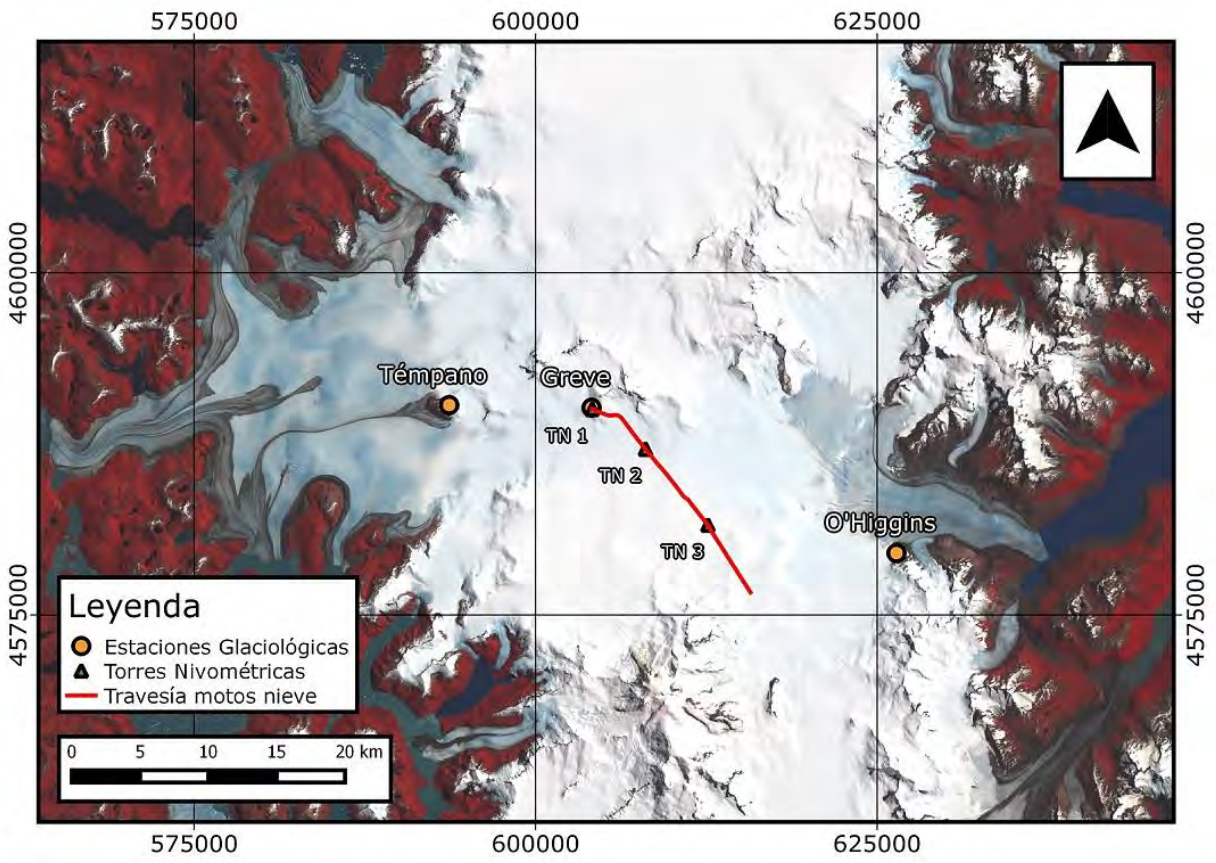


Figura 7.1 Ubicación de las tres torres nivométricas instaladas en el *plateau* de Campo de Hielo Sur (triángulos) y ruta de la travesía en motos de nieve (línea roja).



Figura 7.2 Primera torre nivométrica en operación. Imagen: 28 de septiembre de 2015.

El día 23 de octubre se realizó una travesía terrestre con motos de nieve entre la Estación Glaciológica Greve y la Estación O'Higgins (Figura 7.3), con el fin de instalar las otras dos torres nivométricas comprometidas, y para la medir de acumulación de nieve de la zona.



Figura 7.3 Motos de nieve en formación para la travesía a través de la meseta para la instalación de las torres nivométricas y pozos estratigráficos. A la derecha de las motos se observa el trineo con uno de los segmentos de la segunda torre nivométrica y los implementos necesarios para su instalación.

En esta travesía se instaló la segunda torre nivométrica siguiendo los procedimientos antes descritos, la que quedó ubicada a 5 km de distancia de la Estación Glaciológica Greve en las coordenadas 48°54'30.81''S, 73°27'47.25''O a 1294 m snm. (Figura 7.4). El extremo de la torre nivométrica quedó a una altura de 4.0 m sobre la superficie de nieve.

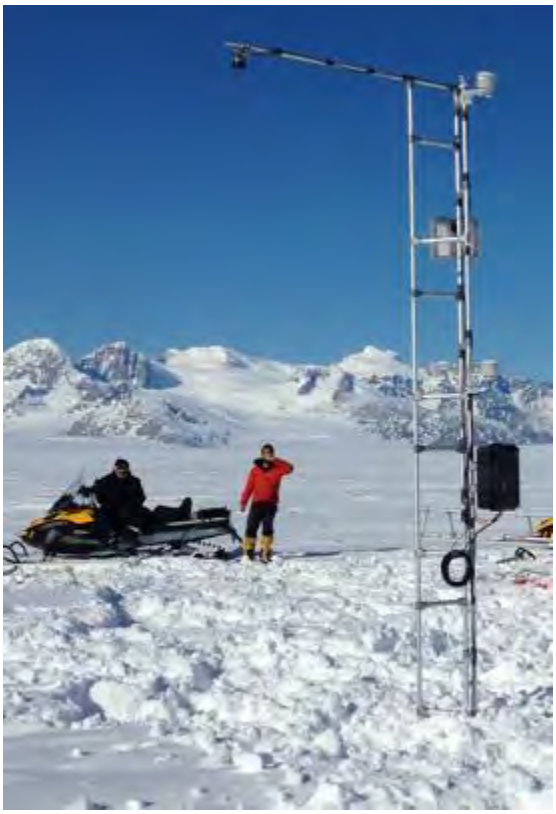


Figura 7.4 Segunda torre nivométrica. Imagen: 23 de octubre de 2015.

La tercera torre nivométrica fue instalada a 12 km de la Estación Glaciológica Greve en coordenadas 48°51’33.94’’S, 73°31’37.05’’O 1178 m snm. (Figura 7.5), de acuerdo al procedimiento ya señalado para las otras dos torres, quedando su extrema a una altura de 3.6 m sobre la superficie de nieve.



Figura 7.5 Tercera torre nivométrica. Imagen: 24 de octubre de 2015.

Cada torre nivométrica cuenta con un sensor de altura de nieve *Sonic Range* SR50A, y cuatro sensores de temperatura: dos para temperatura del aire, a diferente altura; y dos para temperatura de nieve, a diferente profundidad. Como elementos de soporte, cada torre nivométrica cuenta con un *datalogger*, una batería y panel solar.

7.4.2 Pozos estratigráficos

Se realizaron diferentes pozos estratigráficos de nieve en la zona de instalación de cada Torre Nivométrica siguiendo la metodología propuesta por [*Rivera et al.*, 2016] (Figura 7.6).

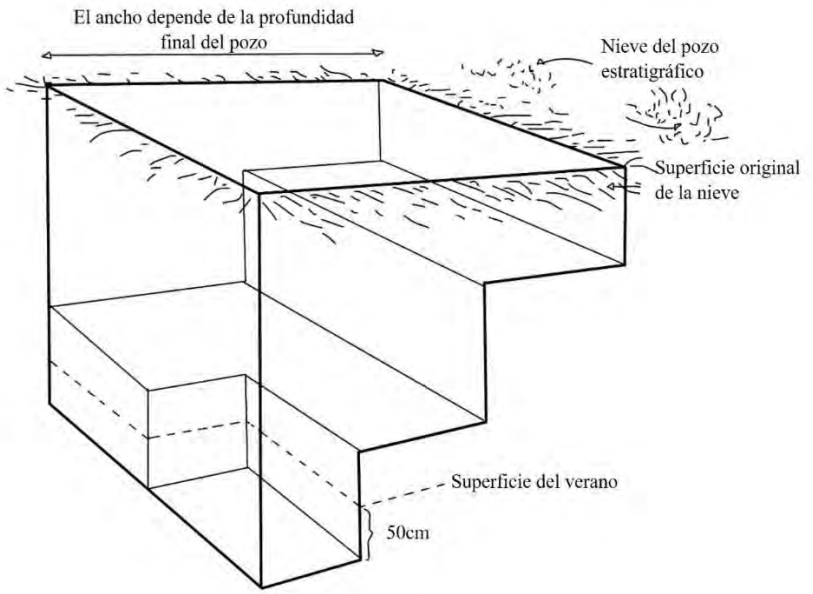


Figura 7.6. Esquema de pozos estratigráficos realizados.

Se realizaron mediciones en dos periodos distintos: las primeras mediciones se realizaron durante la instalación de las torres nivométricas; y el segundo, durante la desinstalación de las torres. Durante el primer periodo de pozos estratigráficos, se realizaron mediciones discretas cada 10 cm del peso de una masa equivalente a 1 litro y la temperatura de la superficie circundante (Figura 7.7). Además, se registraron la profundidad y espesor de cada lente de hielo encontrado durante la ejecución de cada pozo. Por otra parte, durante el segundo período se realizaron las mediciones discretas del peso de la masa equivalente a 1 litro cada 20 cm.

Para la obtención de cada muestra de nieve/neviza se utilizó una pala para realizar las excavaciones, una cuña de un litro de volumen y una espátula. Junto con esto, también se utilizó una balanza de precisión para pesar cada cuña con el material, y un termómetro.

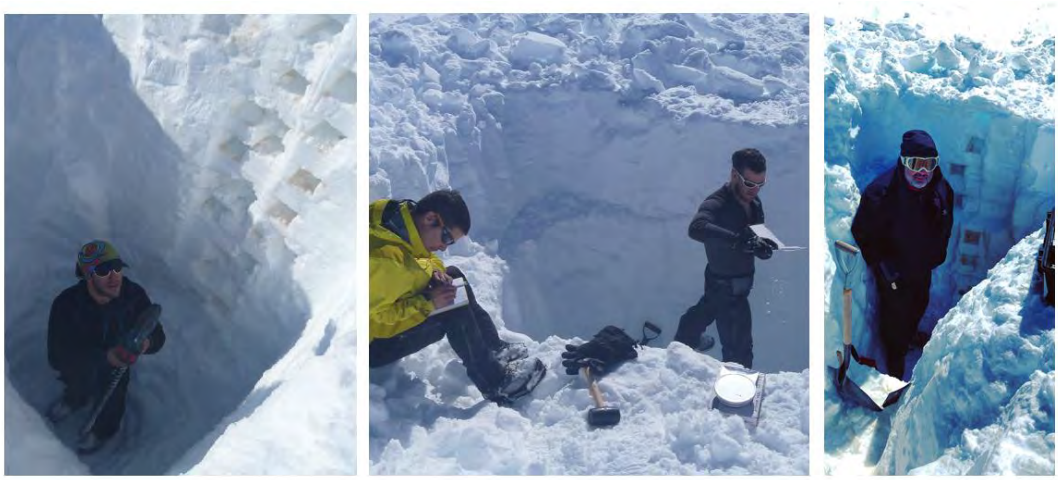


Figura 7.7 Pozos estratigráficos para medición de densidad de nieve. Imágenes: 28 de septiembre al 24 de octubre de 2015.

Los pozos fueron excavados hasta una profundidad máxima de 2.2 m, 2.4 m y 2.8 m, en las torres TN1, TN2 y TN3 respectivamente (Figura 7.1). No pudo medirse a mayor profundidad de la indicada, debido que se topó con lentes de hielo de espesor desconocido que impidieron la penetración de la pared del pozo con la cuña de acero utilizada.

7.4.3 Estaciones AWS

Se utilizaron algunos datos meteorológicos (precipitaciones y humedad relativa) de las estaciones AWS de periferia "Tempano" y "O'Higgins" para comparar con los eventos registrados por el sensor sónico instalado en cada Torre Nivométrica. El procesamiento y análisis de estos datos puede ser visto en detalle en el capítulo 2.1.

7.4.4 Radar

Los detalles de este método son discutidos en el capítulo de radar (Sección 6), por lo que aquí sólo se menciona que para la identificación de isócronas en profundidades someras y con buena resolución, se utilizó el radar GSSI que fue transportado en un trineo atado a una moto de nieve *Sky Doo Scandic SWT 600 E-tec,* que se movió *a* una velocidad constante de 8 km/h. Para la georreferenciación, se usó un GPS *Garmin Monterra*, en el que se capturó la posición en coordenadas UTM y la elevación sobre el nivel del mar en los puntos de inicio y término de cada medición. El perfil medido con este radar GSSI puede verse en la Figura 6.5.

7.5 Resultados

Los resultados serán presentados en secciones separadas de acuerdo al método utilizado para realizar la estimación.

7.5.1 Estimación de acumulación para el periodo estival

Para determinar la acumulación durante el periodo estival, se utilizaron los datos registrados por sensores sónicos de la variación de la altura de la superficie de nieve en las torres nivométricas y los pozos estratigráficos realizados durante octubre de 2015 y julio 2016.

7.5.1.1 Pozos estratigráficos

Se realizaron mediciones de densidad de nieve a diferentes profundidades con el fin de identificar la variación en función de la profundidad y así poder graficar la estratigrafía de la nieve en los sectores de las torres nivométricas. Se realizaron estas mediciones en dos ocasiones (excepto para la torre 2, donde solo se pudo realizar una sola vez por motivos meteorológicos). Los pozos fueron excavados hasta

una profundidad máxima de 2.8 m, debido que se topó con lentes de hielo de espesor desconocido que impidieron la penetración de la pared del pozo con la cuña de acero utilizada. Los detalles de estas mediciones se resumen en la Tabla 7.1 hasta la Tabla 7.5.

Tabla 7.1 Ficha de medición de densidad de nieve en Torre Nivométrica 1 obtenida durante la campaña de julio de 2016.

Fecha	13/07/2016	**Temperatura atmosférica**	-6.24°C	**Pesa**	Electronic kitchen scale: CAMRY (EK2353)	
Hora inicio	12:50					
Hora fin	14:30			**Tara**	963	
Profundidad [cm]	**Peso [gr]**	**Temperatura [°C]**	**Densidad [gr/cm^2]**	**Prof Hielo [cm]**	**Potencia [cm]**	**Obs.**
10	1347	-2.27	0.384	43	1	Nieve granular
20	1431	-0.5	0.468	52	Indeterminada	Neviza con hielo
30	1490	-1.5	0.527			
40	1548	-0.7	0.585			

Tabla 7.2 Ficha de medición de densidad de nieve en Torre Nivométrica 3 obtenida durante la campaña de julio de 2016.

Fecha	16/07/2016	**Temperatura atmosférica**	-4.9°C	**Pesa**	Electronic kitchen scale: CAMRY (EK2353)	
Hora inicio	14:00					
Hora fin	15:00			**Tara**	971	
Profundidad [cm]	**Peso [gr]**	**Temperatura [°C]**	**Densidad [gr/cm^2]**	**Prof Hielo [cm]**	**Potencia [cm]**	**Obs.**
0	1286	-3.4	0.315	30	2	lentes de hielo
10	1391	-1.8	0.42	55	1	lentes de hielo
20	1416	-0.5	0.445	64	2	lentes de hielo
30	1515	-0.6	0.544	79	1	lentes de hielo
40	1432	-0.5	0.461	104	2	hielo
50	1374	-0.6	0.403	137	2	hielo
60	1529	-0.5	0.558	143	2	hielo
70	1494	-0.5	0.523	148	Indeterminada	hielo
80	1504	-0.6	0.533			
90	1441	-0.6	0.47			
100	1433	-0.5	0.462			
110	1486	-0.6	0.515			

120	1569	-0.6	0.598			
130	1534	-0.6	0.563			

Tabla 7.3 Ficha de medición de densidad de nieve en la Torre Nivométrica 1 obtenida durante la campaña de septiembre-octubre 2015.

Fecha	28/09/2015	**Temperatura atmosférica**	4.8 °C	**Pesa**	Electronic kitchen scale: CAMRY (EK2353)
Hora inicio	11:50				
Hora fin	13:50			**Tara**	955
Profundidad [cm]	**Peso [gr]**	**Temperatura [°C]**	**Densidad [gr/cm^2]**	**Prof Hielo [cm]**	**Potencia [cm]**
10	1180	-3.6	0.225	72	1
20	1221	-4.6	0.266	80	6
30	1285	-3.3	0.33	100	2
40	1272	-2.6	0.317	110	1.5
50	1383	-2.7	0.428	115	1.5
60	1382	-2.7	0.427	135	1
70	1390	-2.2	0.435	138	1
80	1367	-2.8	0.412	163	1.5
90	1426	-2.4	0.471	167	1.5
100	1370	-2.2	0.415	177	1
110	1418	-2.3	0.463	180	1
120	1449	-2.3	0.494	182	1.5
130	1430	-2.1	0.475	186	1
140	1421	-2.1	0.466	200	1
150	1461	-2	0.506		
160	1456	-1.9	0.501		
170	1462	-2	0.507		
180	1430	-1.8	0.475		
190	1428	-1.8	0.473		
200	1458	-1.7	0.503		
210	1472	-1.7	0.517		
220	1467	-1.7	0.512		

Tabla 7.4 Ficha de medición de densidad de nieve en la Torre Nivométrica 2 obtenida durante la campaña de septiembre-octubre 2015.

Fecha	23/10/2015	**Temperatura atmosférica**	0.9°C	**Pesa**	Electronic kitchen scale: CAMRY (EK2353)
Hora inicio	10:00				
Hora fin	12:00			**Tara**	963
Profundidad [cm]	**Peso [gr]**	**Temperatura [°C]**	**Densidad [gr/cm^2]**	**Prof Hielo [cm]**	**Potencia [cm]**
20	1336	-1.7	0.373	0	13
40	1426	-0.3	0.463	46	0.5
60	1487	-0.3	0.524	91	1
80	1486	-0.3	0.523	109	1
100	1500	-0.3	0.537	113	1.5
120	1482	-0.4	0.519	144	0.5
140	1483	-0.3	0.52	166	3
160	1482	-0.3	0.519	186	0.5
180	1582	-0.3	0.619	187	0.5
200	1516	-0.3	0.553	188	0.5
220	1492	-0.3	0.529	190	1
240	1528	-0.3	0.565	205	1
260	1505	-0.4	0.542	218	0.5
280	1548	-0.4	0.585		

Tabla 7.5 Ficha de medición de densidad de nieve en la Torre Nivométrica 3 obtenida durante la campaña de septiembre-octubre 2015.

Fecha	23/10/2015	**Temperatura atmosférica**	3 °C	**Pesa**	Electronic kitchen scale: CAMRY (EK2353)
Hora inicio	14:35				
Hora fin	16:30			**Tara**	956
Profundidad [cm]	**Peso [gr]**	**Temperatura [°C]**	**Densidad [gr/cm^2]**	**Prof Hielo [cm]**	**Potencia [cm]**
20	1178	-0.8	0.222	48	1
40	1198	-1.95	0.242	54	2
60	1500	-0.35	0.544	60	2
80	1355	-0.5	0.399	70	2.5
100	1444	-0.8	0.488	150	3
120	1465	-0.95	0.509	170	2
140	1413	-1.15	0.457	180	1
160	1446	-1.3	0.49	185	1
180	1399	-1.3	0.443	192	1
200	1442	-1.5	0.486		
220	1491	-1.55	0.535		
240	1362	-1.6	0.406		

La densidad registrada durante la campaña realizada en julio de 2016 es variable en profundidad, y es difícil determinar la superficie del año hidrológico anterior. En el punto de la Torre Nivométrica 1 se podría pensar que la capa de hielo correspondiente al año hidrológico anterior se encuentra aproximadamente a 45 cm. Mientras que en el punto correspondiente a la Torre Nivométrica 2, la densidad es muy variable y el contenido de lentes de hielo es muy grande, lo cual genera un poco de incerteza respecto al horizonte que corresponde al año hidrológico anterior. Este mismo hecho hace que la densidad de los estratos no sea lineal, sino más bien variable en profundidad.

Respecto a la densidad que fue medida en la campaña de septiembre-octubre de 2015, en el sector de la Torre Nivométrica 1 la densidad es bastante lineal en función de la profundidad y no se observan grandes variaciones en los valores conforme aumenta la profundidad, aun cuando se registraron varios lentes de hielo en el perfil vertical. Mientras que en la Torre Nivométrica 2 nuevamente se observa una variación muy grande a lo largo del perfil vertical, donde se registró un incremento constante hasta los 1.8 m y luego algunas oscilaciones hasta los 2.8 m. Por otra parte, en la Torre nivométrica 3 también se observan algunas variaciones en la densidad de la nieve, pero menos extremas que en el caso anterior y son más bien casos aislados a los 0.6 m, 1.2 m y 2.2 m.

En general, esta situación se podría explicar por un fuerte efecto de recongelamiento en profundidad debido a las altas temperaturas a las que estaría expuesta la superficie en los puntos de las Torres nivométricas 2 y 3. Mientras que, en el caso de la Torre 1 este efecto de recongelamiento es casi imperceptible (si es que existe) en los registros de densidad, y por lo tanto, se podría pensar en un efecto altitudinal

que podría estar condicionando el recongelamiento en los puntos más bajos (Torre 2 y 3).

7.5.1.2 Torre nivométrica 1

La primera torre fue instalada en el *nunatak* Greve y tuvo un periodo continuo de registros desde el 01 de octubre de 2015 hasta el 08 de febrero de 2016, cuando la estructura comenzó a inclinarse producto de la ablación en el sitio.

Los datos colectados fueron procesados e inspeccionados visualmente para su posterior análisis. Los datos fueron separados en acumulación, ablación y balance para compararlos con los registros de temperatura atmosférica medidos por los sensores térmicos instalados a 4 m (Figura 7.8). Estos datos son originalmente detectados como una distancia en metros entre el sensor sónico y la superficie de la nieve, lo que implica que al aumentar la distancia registrada aumenta la ablación de la superficie. Para procesar y comparar los datos posteriormente con los registros de precipitación y los registros de los pozos estratigráficos, estos datos fueron transformados directamente en variación de altura (Figura 7.8). Adicionalmente, se filtraron todos los *outlayers* mediante el análisis de la varianza para eliminar el ruido de la señal con información.

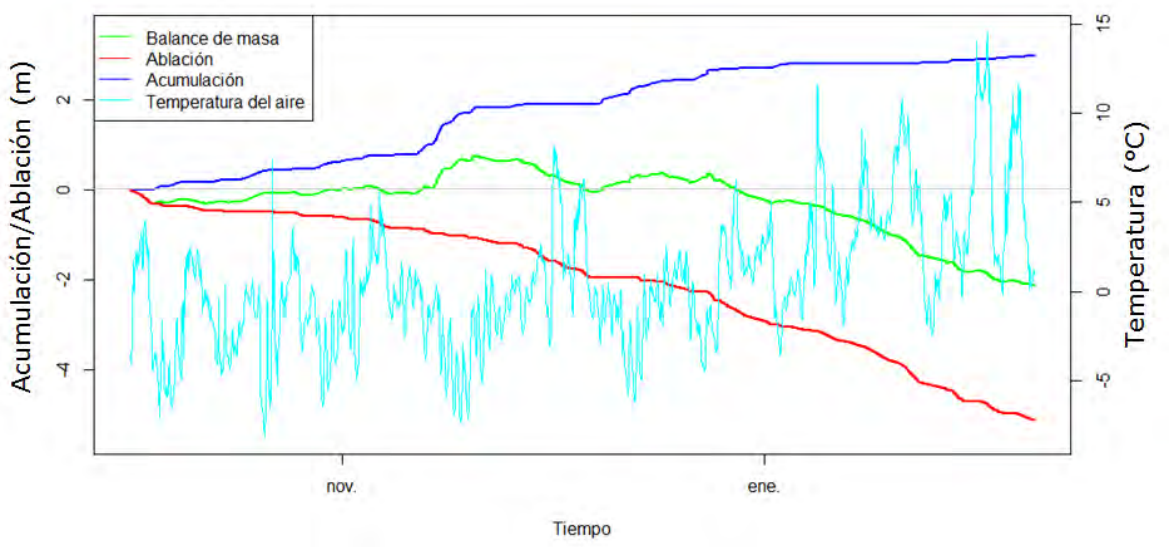


Figura 7.8 Balance de masa de la torre nivométrica 1 para el período de verano.

A partir del procesamiento de los datos se logró estimar la precipitación acumulada durante el período, así como la ablación acumulada en metros de nieve. Estos valores corresponden a 2.98 m de acumulación y 5 m de ablación, y un balance total negativo de 2 m para el período estival (Figura 7.8). Además, se analizaron estas variables en función de la temperatura registrada por la torre nivométrica para detectar el tipo de relación entre estas variables. Se detectó una relación entre las temperaturas, la ablación y la acumulación: (i) Las temperaturas más bajas están asociadas a eventos de acumulación (relación negativa) registrados en la acumulación calculada (Figura 7.8), y (ii) las temperaturas más cálidas están asociadas a eventos de ablación (relación positiva) (Figura 7.8). Se observa que desde aproximadamente finales de diciembre hasta el final del periodo, las temperaturas tienden a incrementar y el proceso predominante es la ablación, salvo algunos eventos aislados menores de acumulación.

Posteriormente, los valores registrados en metros de nieve fueron transformados a metros equivalentes de agua para lo que se utilizó una

densidad de 0.45 gr/cm^3 como promedio obtenido de los pozos de nieve, constituida por nieve humedad con muchas evidencias de recongelamiento con lentes de hielo que son fácilmente identificables en los pozos estratigráficos realizados durante 2015 y 2016 (Figura 7.9).

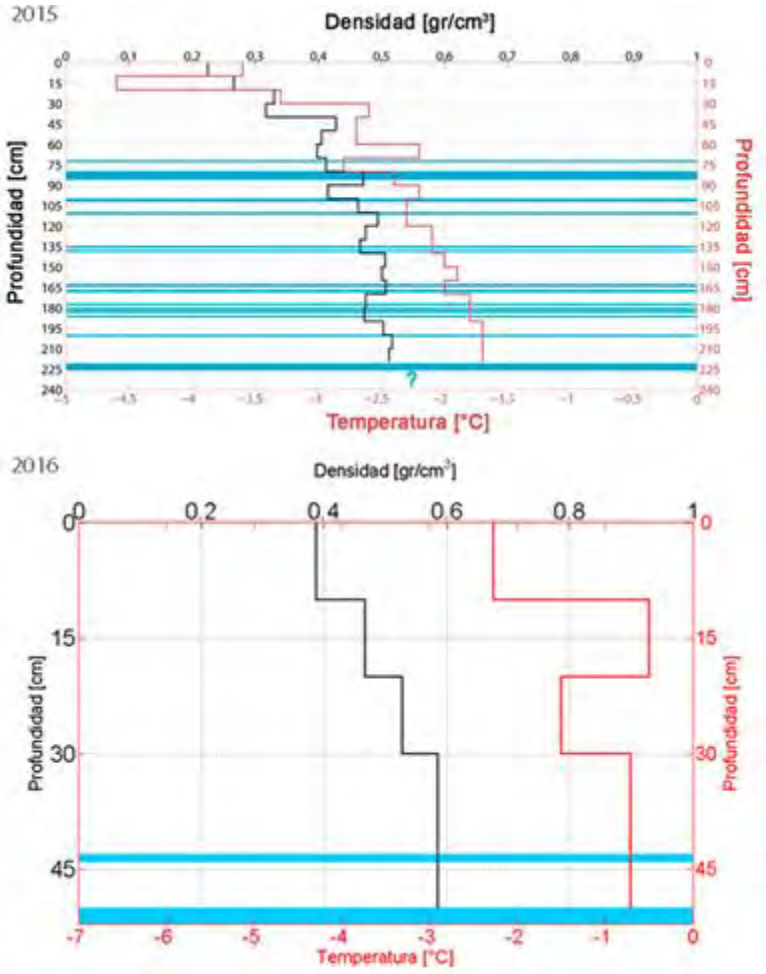


Figura 7.9 Pozos de nieve en TN1 (48°50'1,92''S, 73°34'51,12''O) del Glaciar Greve realizados en 2015 y 2016. En negro, densidades de nieve medidas con cuña. En rojo, temperatura de la nieve medida con termistores. En azul, presencia de lentes de hielo en la columna vertical.

Con estos valores de densidad se obtuvo una ablación acumulada total equivalente a 2.3 m eq.a., una acumulación total de 1.3 m eq. a. y un balance de 0.95 m eq.a. para el periodo registrado (Figura 7.10).

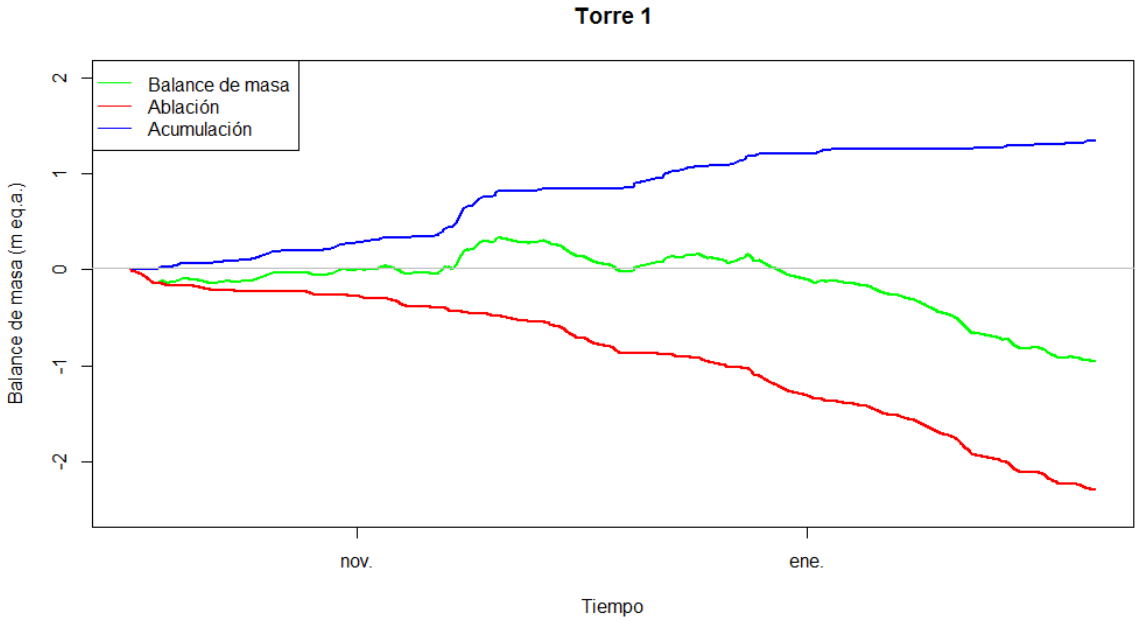


Figura 7.10 Balance de masa (m eq.a.) de la torre nivométrica 1 para el período de verano (octubre–febreo)

Por otra parte, los datos del balance de masa en m eq.a. fueron comparados con los datos de precipitación disponibles de las estaciones meteorológicas AWS instaladas en la periferia de CHS, particularmente las estaciones de Témpano y de O'Higgins (Figura 7.11).

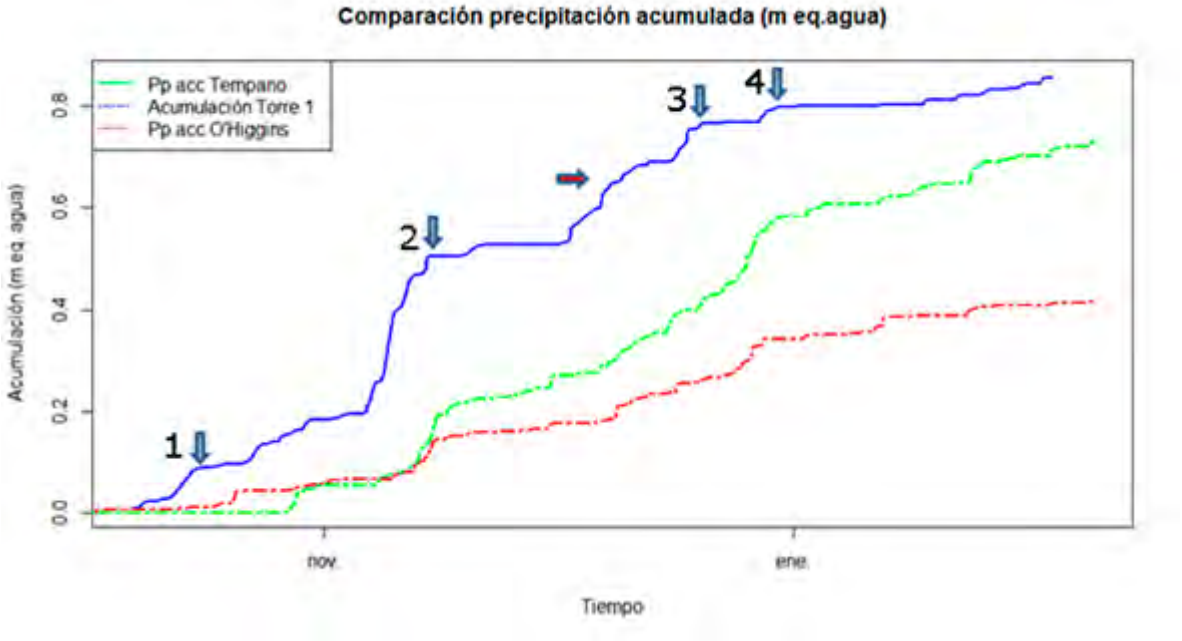


Figura 7.11 Registros de acumulación de la torre nivométrica 1 (m eq.a.) comparados con precipitaciones registradas en estaciones AWS periféricas de Témpano y O'Higgins. Las flechas con números indican los eventos que se observan en los registros de precipitación de las estaciones AWS.

De la comparación de la acumulación en m eq.a. con la precipitación acumulada en las estaciones periféricas Témpanos y O'Higgins, para el mismo periodo, se observan claramente los eventos de precipitación que contribuyeron a la acumulación registrada por el sensor sónico en la torre nivométrica. Se identifican 5 eventos mayores que aportaron gran cantidad de masa en un periodo de tiempo relativamente corto. Estos eventos se reflejan de mejor manera en los datos de precipitación registrados en la estación O'Higgins. El primer evento no se refleja en la estación de Témpano, mientras que el segundo evento es mucho mayor y si se observa en ambas estaciones AWS, por lo tanto se podría inferir que se trata de un evento más regional que afectó a toda la zona de CHS y que aportó una masa mucho mayor a la acumulación. El tercer evento es menor, pero también se ve reflejado en las dos estaciones y

aportó una cantidad mayor a la del primer evento. El cuarto evento se observa en ambas estaciones con una gran acumulación al nivel del mar, pero baja acumulación a mayor altitud lo que ocasionó una pequeño salto en los registros de la torre nivométrica. Finalmente, el último evento (flecha roja en Figura 7.11) no tiene sincronicidad alguna con los registros de precipitación de las estaciones AWS periféricas. Podría ser atribuido a nieve en deriva que fue depositada en el sector de la torre nivométrica.

En general, se observa claramente el gradiente altitudinal de la precipitación y en menor medida el gradiente E-W de la precipitación. La acumulación total de nieve m eq.a. es mayor a la acumulación a nivel del mar (como se observa en el evento 2), y además se observa que la precipitación acumulada en la estación Témpano es mayor que la precipitación acumulada en la estación O'Higgins.

7.5.1.3 Torre nivométrica 2

La segunda torre nivométrica fue instalada a 5 km al este del *nunatak* Greve (Figura 7.1) y tuvo un periodo continuo de registros desde el 25 de octubre de 2015 hasta el 22 de marzo de 2016, cuando los datos registrados comenzaron a marcar valores erróneos que probablemente se deben a que la ablación en la estación generó la caída de la estructura.

Se siguió el procedimiento estandar para procesar los datos, esto significa que los datos fueron procesados e inspeccionados visualmente para evaluar la calidad de los datos, para posteriormente se utilizados en el analisis de las precipitaciones solidas. Los datos fueron separados en la componente de acumulación y ablación, y finalmente en el la combinacion de ambos componente en el balance de masa. Los datos fueron transformados desde diferencia de altura entre el sensor y la

superficie a variacion de la altura de la superficie (asociada a la variacion de la altura de la nieve) para facilitar la interpretación de la variabilidad temporal y para analizar estos datos con los registros de temperatura. Finalmente, los datos fueron evaluados en terminos de sus caracteristicas estadisticas básicas, y mediante el analisis de la varianza de los datos se eliminaron los outlayers que estaban ocacionando ruido en la señal registrada.

Adicionalmente, se compararon los registros temporales de acumulación/ablación con los registros de temperatura atmosférica en el sector de la torre nivométrica (Figura 7.12).

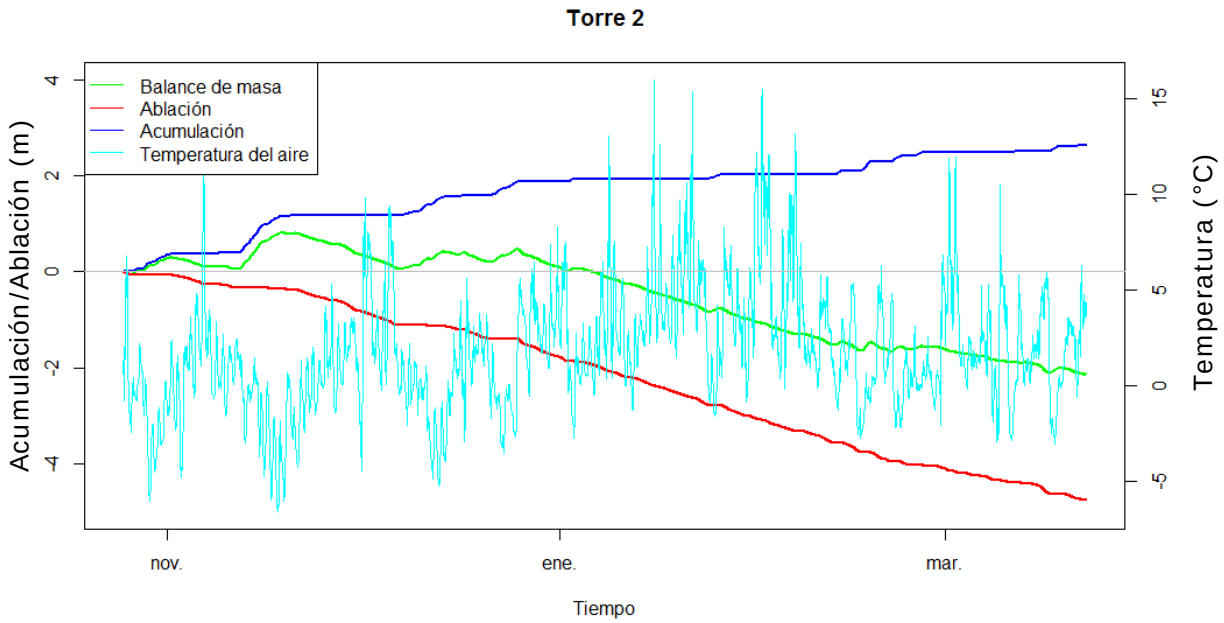


Figura 7.12 Balances de masa de la torre nivométrica 2 para el período de verano

Luego de procesar y preparar los datos para su posterior análisis, se procedió a calcular la acumulación y ablación total del periodo junto con el balance total del periodo con registros. Los montos totales fueron de 2.6 m y -4.8 m de acumulación y ablación, respectivamente. En cuanto

al balance total de la temporada registrada, se calculó un balance total de -2.1 m de nieve.

Al comparar las variables de acumulación y ablación con los registros de temperatura (Figura 7.12), se observó una buena correspondencia entre los registros. Por una parte, mientras la temperatura registrada aumenta, la acumulación disminuye y la ablación aumenta. Por otra parte, mientras la temperatura disminuye, la ablación se reduce y la acumulación se incrementa.

Respecto a la temporalidad de las temperaturas registradas, se puede mencionar que desde fines de diciembre se observa un incremento de las temperaturas relativamente constante y un proceso predominante de ablación. Sin embargo, a partir de febrero las temperaturas descienden y los promedios horario del registro no superan el punto de congelación salvo algunos eventos aislados durante los primeros días de marzo (Figura 7.12). Es interesante mencionar que, a pesar de que las temperaturas se mantienen bajo los 0 °C prácticamente durante todo el último periodo, la acumulación no muestra grandes incrementos en el registro.

Luego, los registros de ganancia y pérdida de nieve fueron transformados en m eq. a. para ser comparados posteriormente con los registros de precipitación de las estaciones AWS de periferia (Témpano y O'Higgins). Al igual que en el caso anterior, se analizaron los pozos estratigráficos realizados en dos fechas (octubre 2015 y julio 2016) en el sector de la torre nivométrica 2 (Figura 7.13) y se definió una densidad promedio de 0.45 gr/cm^3 para convertir los valores en metros equivalentes de agua.

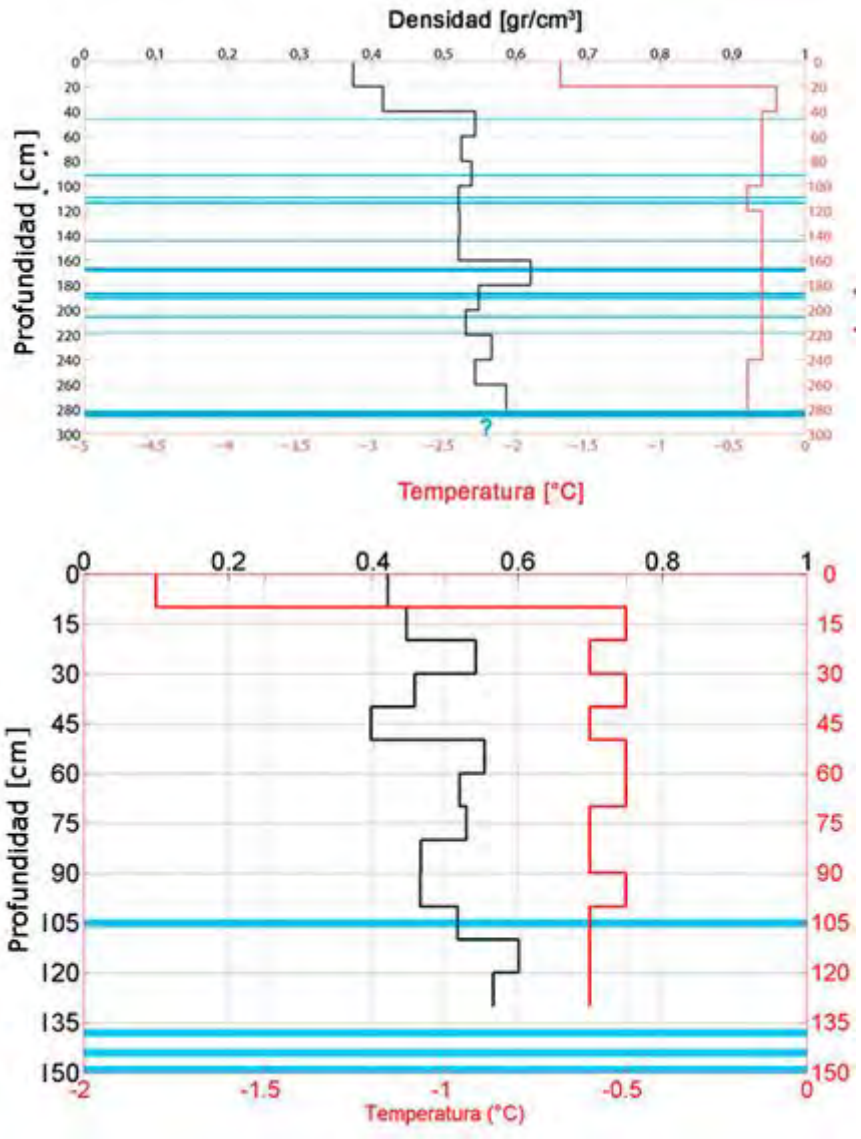


Figura 7.13 Pozo de nieve TN2 (48°54'30,81''S, 73°27'47,25''O) del Glaciar Greve realizados en dos fechas. En negro, densidades de nieve medidas con cuña. En rojo, temperatura de la nieve medida con termistores. En azul, presencia de lentes de hielo en la columna vertical.

Nuevamente ocurre el efecto de recongelamiento de la nieve durante la percolación de la nieve derretida, tal como se puede observar en los dos pozos estratigráficos realizados en diferentes fechas en el mismo sector de la torre 2 (Figura 7.13). En el pozo se observan varias capas que son atribuidas al proceso de recongelamiento, y por lo tanto son capas con una densidad mucho mayor que contribuyen al incremento del promedio de la densidad de la nieve que se pierde. De acuerdo al cálculo realizado

con estas densidades, se obtuvieron valores de 1.1 m eq. a. para la acumulación y -2.15 m eq. a. para la ablación, mientras que el balance del periodo (octubre-marzo) fue de -0.96 m eq. a. (Figura 7.14).

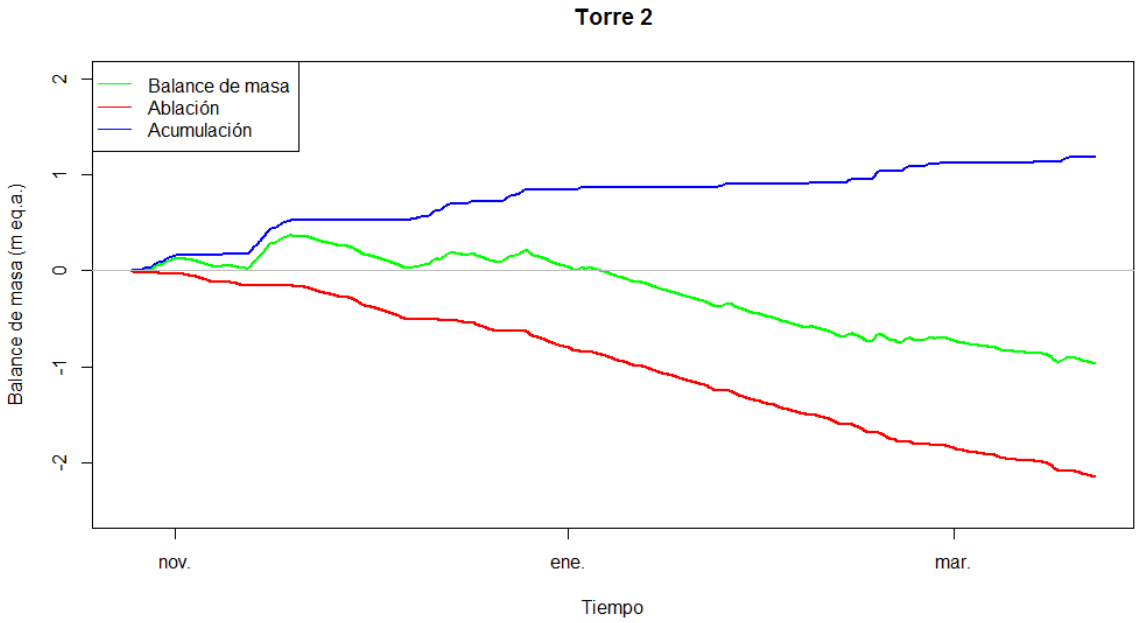


Figura 7.14 Balance de masa (m eq.a.) de la torre nivométrica 2 para el período estival.

Finalmente, los datos equivalentes de agua fueron comparados con los datos de precipitación acumulada en las estaciones AWS de Témpano y de O'Higgins (Figura 7.15).

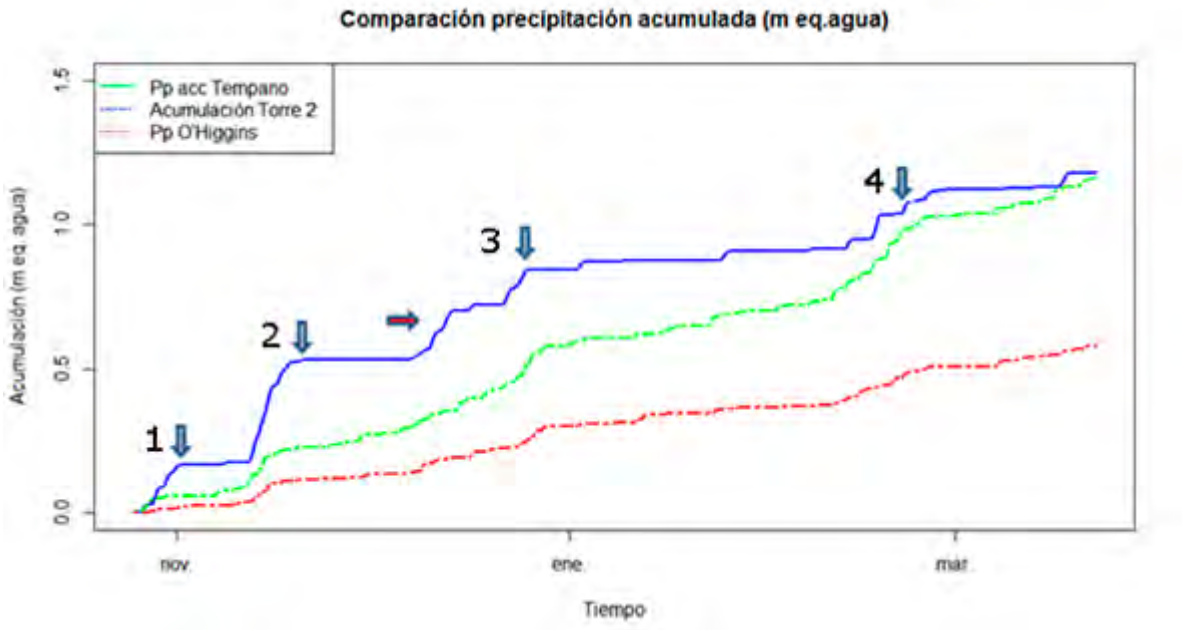


Figura 7.15 Registros de acumulación de la torre nivométrica 2 (m eq.a.) comparados con precipitaciones registradas en estaciones AWS periféricas de Témpano y O'Higgins. Las flechas con números indican los eventos que se observan en los registros de precipitación de las estaciones AWS

A partir de la Figura 7.15 se pueden observar claramente 5 eventos de precipitación que influyeron directamente en la acumulación registrada en la torre nivométrica 2 (indicados con flechas). Sin embargo, solo 3 de estos eventos se reflejan en los registros de precipitación de las estaciones AWS de periferia (flechas 1, 2 y 3), y un cuarto evento que no se observa claramente en los registros de Témpano y muy sutilmente en los registros de O'Higgins (flecha roja). Al parecer, el primer evento es de carácter más regional y contribuyó en mayor medida a la acumulación registrada en la torre nivométrica 2. Se puede inferir que este evento se desplazó desde el oeste hacia el interior de CHS y que

conforme avanzó hacia el este disminuyó en intensidad (menor precipitación registrada en la estación AWS de O'Higgins). El segundo evento (número 2) se observa en los dos registros de las estaciones AWS periféricas. Sin embargo, se advierte que la precipitación se registró un poco antes en la estación O'Higgins y luego en la estación Témpano y la cantidad de nieve aportada fue menor que en el evento anterior. El tercer evento (número 3 en el gráfico) es sincrónico en los tres registros y se podría asociar a un frente de precipitación proveniente desde el océano, pero la acumulación en la torre nivométrica es menor que en la estación de Témpano y mayor que en la estación de O'Higgins. El cuarto evento también es sincrónico con la precipitación registrada en la estación AWS Témpano y en menor medida con el registro de la estación AWS O'Higgins. La relación del ultimo evento (flecha roja), entre la torre nivométrica 2 y las estaciones AWS periféricas, no es tan clara porque nos e ve ningún incremento abrupto en la acumulación registrada en las estaciones AWS, sin embargo se observa una acumulación progresiva en los registros. Por lo tanto, se podría asociar esta precipitación a una acumulación producto del arrastre de la nieve fresca por el viento (nieve en deriva) que está siendo depositada en CHS.

Los datos de distancia entre el sensor y la superficie de la nieve registrados por la torre nivométrica 3 lamentablemente se corrompieron, probablemente porque el sensor quedó enterrado en nieve por caída de la estructura (Figura 7.16). Sin embargo, los datos de la temperatura registrados fueron continuos y consistentes, por lo que pudieron ser utilizados para el análisis de temperatura del aire.

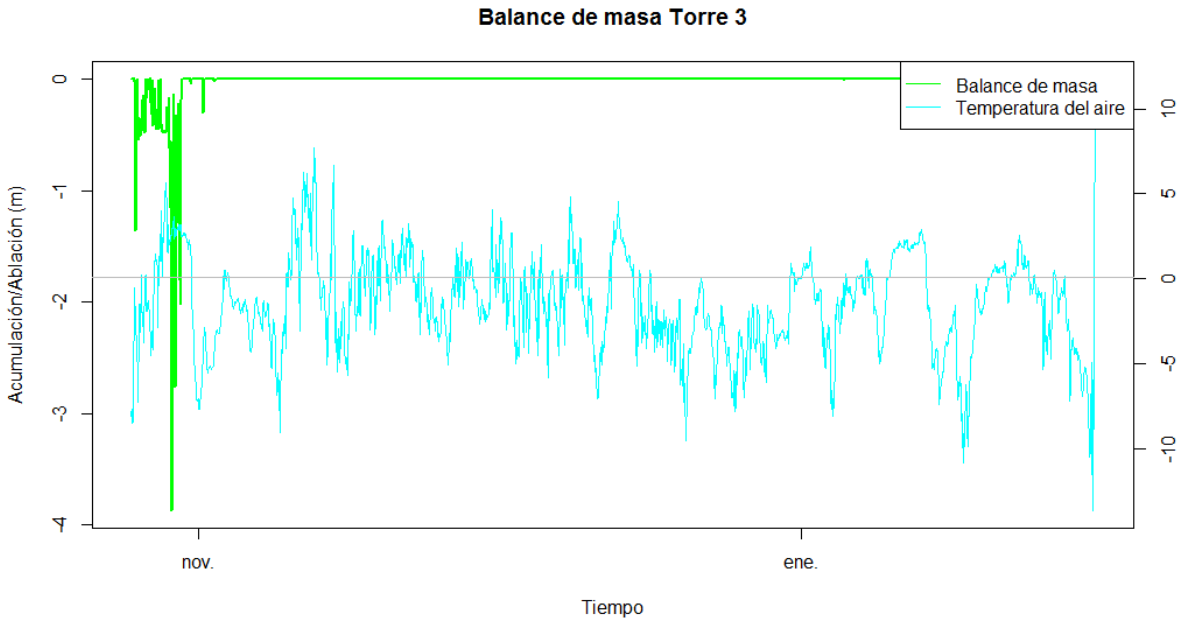


Figura 7.16 Datos registrados por la torre nivométrica 3 durante el período estival 2015-2016.

Los datos de temperatura sugieren que a lo largo de la serie, predominan las temperaturas bajo el punto de congelación con 8 eventos de corta duración que superan los 0 °C, llegando incluso a los 5 °C.

Tal como se observa en el pozo estratigráfico realizado durante la instalación de la torre 3 (Figura 7.17), también existe el efecto identificado en los demás pozos excavados. El recongelamiento de la nieve también es un proceso fundamental que ocurre en el sector. En la figura Figura 7.17 se observan varios lentes de hielo que varían en su espesor. De lo anterior se desprende que no hay un periodo de acumulación ni de ablación definido, sino que ambos procesos ocurren durante todo el periodo del año hidrológico. Sin embargo, al igual que en las otras dos torres nivométricas, durante el período estival predomina el proceso de ablación y durante el invierno predomina el proceso de acumulación.

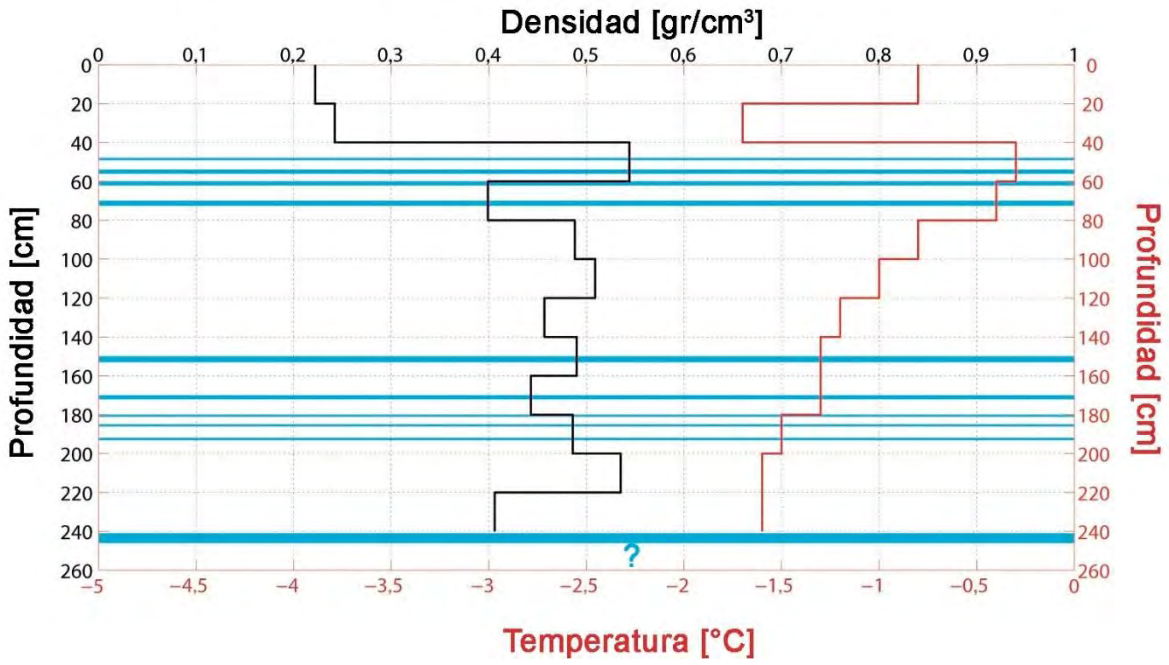


Figura 7.17 Pozo de nieve en TN3 (48°51’33,94’’S, 73°31’37,05’’O) del Glaciar Greve. En negro, densidades de nieve medidas con cuña. En rojo, temperatura de la nieve medida con termistores. En Azul, presencia de lentes de hielo en la columna vertical.

Adicionalmente, se compararon los registros de acumulación de ambas torres nivométricas con los registros de precipitación en las estaciones AWS de periferia (Figura 7.18).

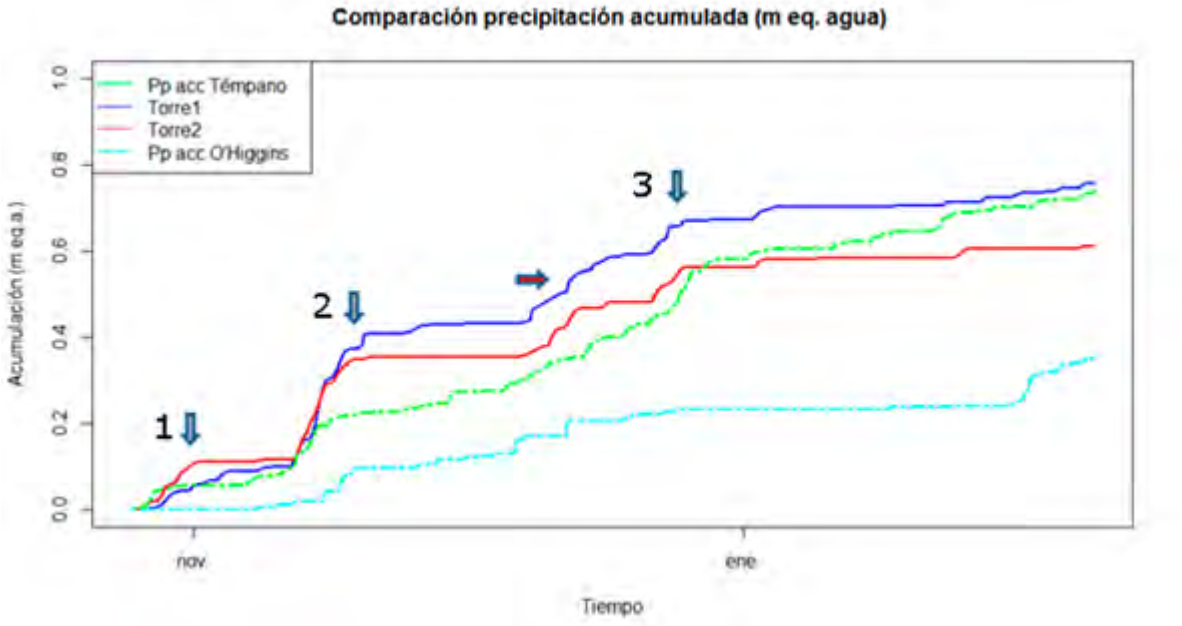


Figura 7.18 Comparación entre los registros de acumulación de las torres nivométricas (1 y 2) y los registros de precipitación acumulada de las estaciones AWS periféricas Témpano y O'Higgins. Las flechas indican eventos identificados en los datos.

Se observa en la Figura 7.18 que los eventos registrados en las estaciones nivométricas son sincrónicos entre ellos y, en menor medida, con los registros de precipitación acumulada medidos en las estaciones AWS periféricas. Se puede observar que en el primer evento registrado por las torres nivométricas, la acumulación en la torre 2 fue superior y mucho más abrupta que la acumulación registrada en la torre 1, y este evento está relacionado más con la precipitación registrada en la estación AWS Témpano. El segundo evento registrado, se observa en todos los registros de manera sincrónica. En este evento, el gradiente altitudinal y longitudinal se observa claramente al comparar las

acumulaciones entre la torre 1 y 2. El tercer evento también es sincrónico entre las torres nivométricas y relativamente sincrónico con el registro de precipitación de la estación AWS Témpano. Este evento no se observa claramente en los registros de precipitación de la estación AWS O'Higgins, por lo que se podría concluir que este evento provino desde el océano y fue disminuyendo en intensidad a medida que ingresa a CHS.

Por otra parte, un evento en particular (flecha roja en la Figura 7.18) es sincrónico entre las torres nivométricas, pero no se ve una clara correspondencia con los registros de las estaciones AWS. Por lo tanto, se podría pensar en una acumulación de nieve fresca por arrastre que ocurrió durante el evento de precipitación progresivo registrado por la estación AWS Témpano (Figura 7.18).

A lo largo de todo el registro es posible apreciar el gradiente longitudinal de las precipitaciones que indica una mayor precipitación hacia el occidente (estación AWS Témpano) y una menor precipitación hacia el oriente (estación AWS O'Higgins). Un efecto muy parecido se observa en las precipitaciones acumuladas en las torres nivométricas, donde los registros de la torre nivométrica 1 son mayores que los registros de la torre nivométrica 2, salvo un evento particular hacia el comienzo de la serie temporal (los últimos días de octubre y primeros días de noviembre).

Finalmente, hacia el término de la temporada con registros se observa un evento de precipitación en la estación AWS de O'Higgins, pero no se ve una gran contribución en la acumulación de nieve en la torre 1 o 2.

7.5.2 Estimación de acumulación promedio para el periodo de invierno 2015

Debido a que no existe datos torres nivométricas durante el periodo de acumulación (abril 2015 a septiembre 2015), esta fue determinada de forma indirecta usando los datos de precipitación de las estaciones de periferia (O'Higgins y Témpano). Para ello se estimaron gradientes de precipitación lineales entre la acumulación observada en las torres nivométricas y las mismas estaciones meteorológicas en el periodo estival. Además se estimó la ablación para cada torre nivométrica, por lo que se estimó un DDF sobre la base de los datos observados en el periodo estival.

Los datos ablación de la Torre 1 llegan a 2.3 m e.a. en el periodo con un promedio de las temperaturas positivas de 3.3 °C, ello determina un DDF de nieve de 5.3 mm e.a. d^{-1} $°C^{-1}$. Este mismo DDF es aplicado a los datos de temperatura de invierno para ambas torres. En el caso de la Torre 1 se asumieron los datos de la estación HS en glaciar Greve ya que se encuentran prácticamente a la misma altitud, y para la Torre 2 se utilizaron los datos de la estación O´Higgins en periferia, datos a los cuales se les aplico un gradiente de temperatura observado (Sección Estimación del Derretimiento en CHS) de 0.0076 °C m^{-1}.

En cuanto a la acumulación se estimaron gradiente del orden de 0.0033 mm m^{-1}. Tanto para la Torre 1 como la Torre 2 se utilizaron los datos de precipitación de la estación O'Higgins en periferia ya que la estación Témpano en periferia no presentaba datos en el periodo marzo a junio de 2015. No obstante y reconociendo las diferencias longitudinales en la precipitación, se estimó un factor de diferencia entre la zona oriental y occidental de CHS. Para ello se utilizaron los datos de precipitación para el periodo común de las estaciones O'Higgins y Témpano en periferia

(junio a octubre 2015). Este factor indica que la precipitación en el sector occidental de CHS es 2.2 veces la del sector oriental. Por lo tanto para la Torre 1, al gradiente lineal de precipitaciones se le agrego este factor, mientras que a la Torre 2 solo se aplicó el gradiente de precipitaciones debido a que esta torre se encuentra hacia el margen oriental.

7.5.2.1 Torre nivométrica 1

Para la Torre 1 se estimó que la acumulación en el periodo 1 de abril a 30 de septiembre fue de 4.38 m eq. a. mientras que la ablación llegó a 0.45 m eq. a. llegando a un balance de masa positivo de 3.93 m eq. a.

Se aprecia que la ablación principalmente ocurre en los primeros meses, abril y mayo, para luego tender a estabilizarse debido a la baja de las temperaturas del aire en los meses de invierno. El balance de masa, como es de esperar en el invierno, se encuentra dominado por la acumulación.

7.5.2.2 Torre nivométrica 2

Para la Torre 2 se estimaron los componentes desde el 1 de abril al 25 de octubre de 2015. En la Figura 7.19 se aprecia esta estimación. La acumulación llegó a 1.88 m eq. a., la ablación a 0.69 m eq. a. y por lo tanto se obtuvo un balance de masa positivo de 1.19 m eq. a.

En este caso existe mayor ablación ya que la Torre 2 se encuentra unos 100 m de altitud bajo la Torre 1, apreciándose incluso eventos de ablación durante el invierno. La mayor ablación ocurre en abril y mayo y luego en octubre. No obstante lo anterior el balance de masa se encuentra dominado por la acumulación.

7.5.3 Estimación de acumulación promedio para el periodo 2015-2016

Considerando los datos de balance de masa obtenidos para el periodo estival, a partir del análisis de las torres nivométricas 1 y 2, y los datos de balance de masa del periodo de invierno estimados con la extrapolación de las precipitaciones ponderado por el gradiente calculado (acumulación) y los montos estimados a partir de un DDF calculado (ablación), se logró reconstituir el periodo completo para el año hidrológico 2015-2016.

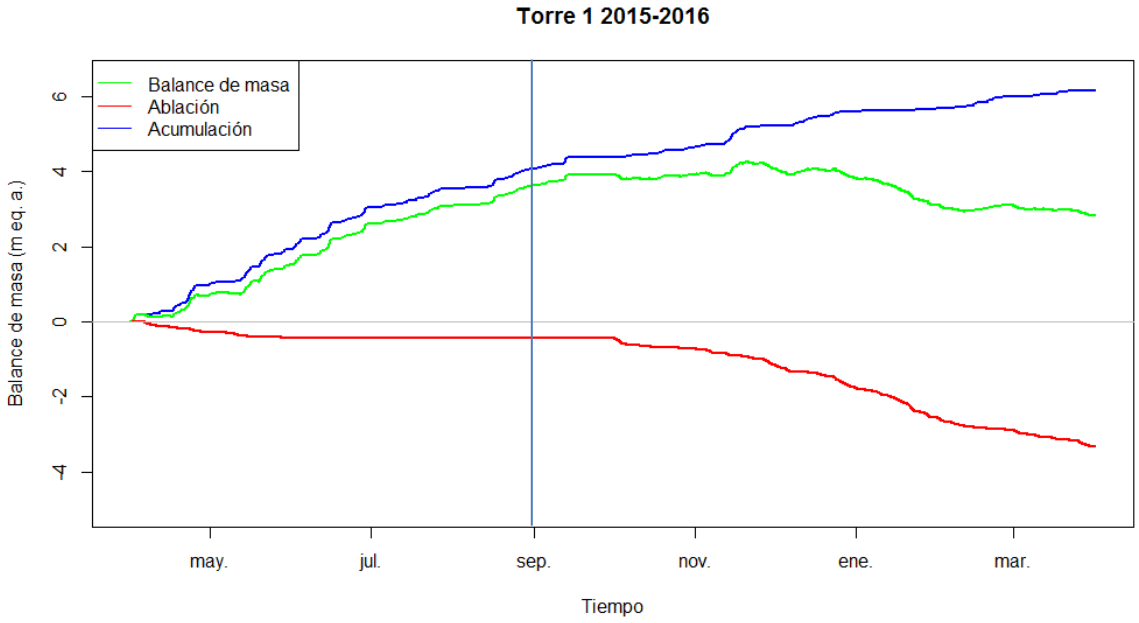


Figura 7.19 Balance de masa de la torre nivométrica 1 para el período completo del año hidrológico 2015-2016. En el gráfico, la línea vertical separa el periodo de acumulación del periodo de ablación.

Para la torre 1, se aprecia en la Figura 7.19, que la acumulación anual llega aproximadamente a 6.2 m eq. a. mientras que la ablación llega a los -3.2 m eq. a. el balance de masa por lo tanto es de 2.8 m eq. a. Se

aprecia que el balance de masa se encuentra dominada por la acumulación hasta diciembre.

Por una parte, se observa que el balance neto anual 2015-2016 es positivo lo cual es esperable para la zona donde se encuentra instalada la torre nivométrica 1 (zona de acumulación del glaciar Greve). Además, esto es consecuente con la información obtenida a partir de los pozos estratigráficos realizados durante octubre 2015, donde la superficie del año hidrológico 2013-2014 fue detectada a los 2.8 m. Por otra parte, se observa que a partir del mes de octubre la ablación comienza y aumenta progresivamente hasta el fin del año hidrológico. Considerando que la Torre 1 se encuentra a 1415 m snm, la dinámica de la ablacón podría ser indicativa de que extensas zonas de la meseta de CHS presentan episodios de derretimiento incluso durante la primavera.

En cuanto a la torre nivométrica 2 (Figura 7.20), se puede mencionar que el balance neto es positivo (0.23 m eq. a.), aunque mucho menor que en la torre 1 (aproximadamente 10 veces) y la acumulación alcanza valores de 3.1 m eq. a. y una ablación equivalente a 2.8 m eq. a. Esto es indicativo de los fuertes contrastes entre los sectores occidentales y orientales, y además de el gradiente altitudinal entre las dos torres. Un aspecto importante es que la torre nivométrica 2 se encuentra a 1294 m snm., mientras que la torre 1 se encuentra a 1415 m snm.

El balance de masa levemente positivo es concordante con la estimación de linea de equilibrio calculada por De Angelis (2014), que para el glaciar O'Higgins es de 1200 +/- 20 m snm.

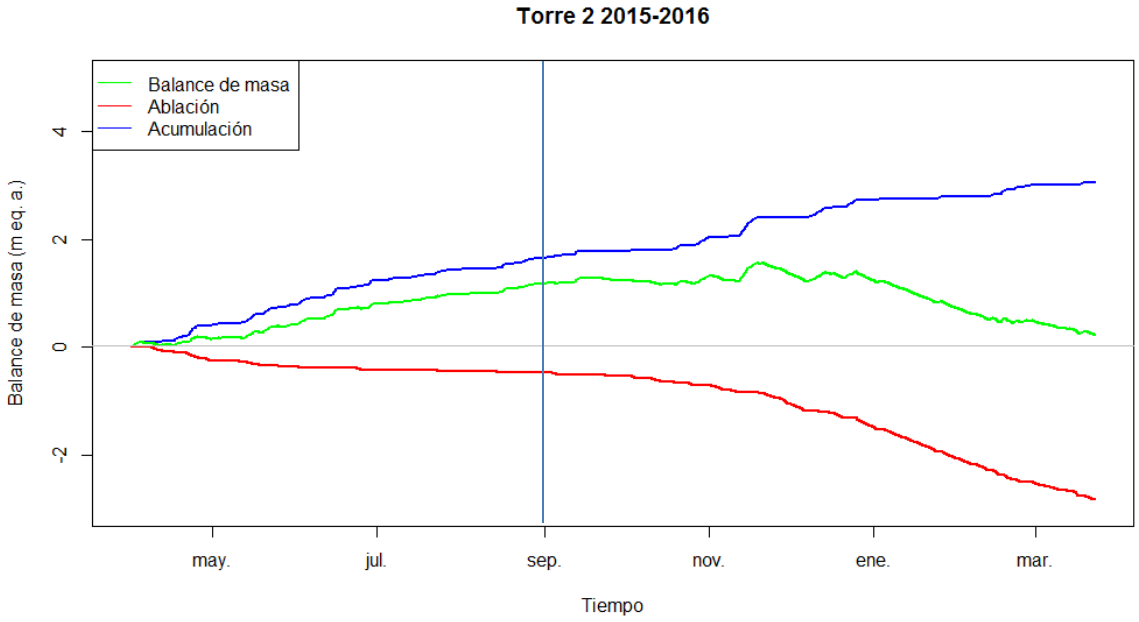


Figura 7.20 Balance de masa de la torre nivométrica 2 para el período de invierno. En el gráfico, la línea vertical separa el periodo de acumulación del periodo de ablación.

7.5.4 Balance de masa interanual con radar

Las isócronas vectorizadas en el radargrama obtenido el día 24 de octubre del 2014 (Figura 7.21) muestran una clara continuidad y correspondencia de espesores, variando sus pendientes en función del desplazamiento de la medición desde la Torre 2 a la 3, donde hay una diferencia de aproximadamente 120 m. Se observan diferentes horizontes que representan capas anuales, acumuladas por año hidrológico, que en general están separadas por lentes de hielo más gruesos, los que generan una discontinuidad en la permitividad dieléctrica, la que al ser interceptada por las ondas de radar a 400 MHz, generan un retorno interno característico.

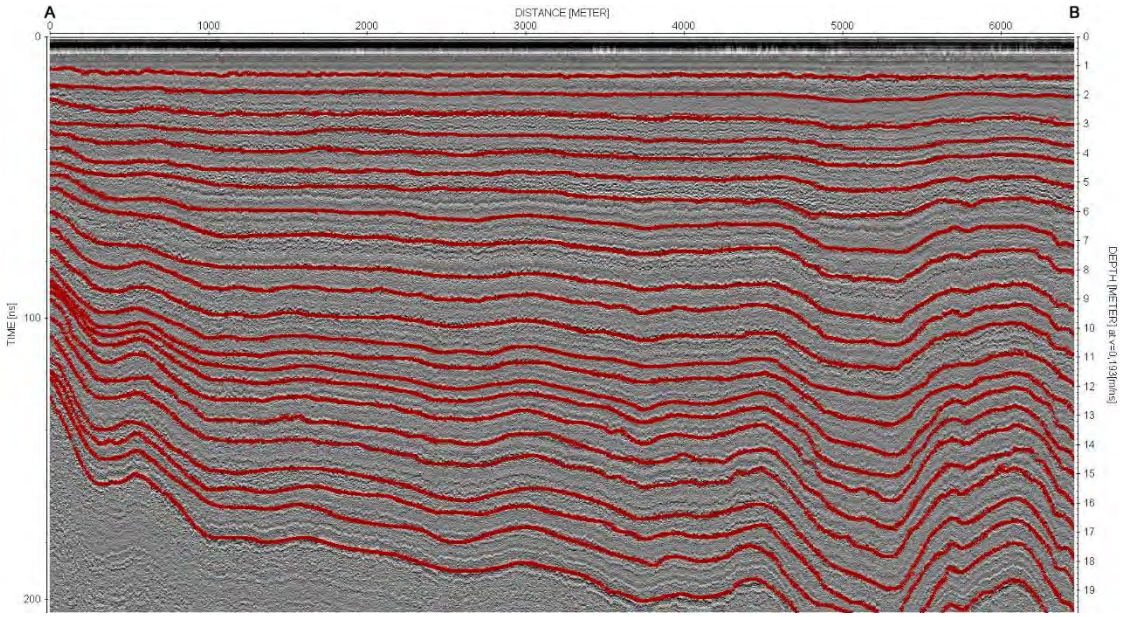


Figura 7.21 Radargrama del perfil A-B medido con el radar terrestre, en el que se identifican las capas de acumulación detectadas (Localización del perfil A-B en Figura 6.5).

En algunas capas, se observa que el contraste es menor y, por lo tanto, no se interpretaron en toda la extensión del trayecto realizado. Este cambio de contraste puede atribuirse principalmente a la pendiente de las capas, ya que si éstas poseen pendientes muy inclinadas, resulta más difícil detectarlas mediante la antena de radar, ya que la onda reflejada es dirigida a una dirección lejana a la antena receptora.

Las isócronas detectadas en los radargramas no son superficies totalmente horizontales debido a la topografía subglacial. Por este motivo, se calculó el espesor promedio de cada isócrona para representar un horizonte individual. Este promedio será representativo por lo tanto a la Torre 2. Cada una de estas isócronas detectadas fue asumida como una superficie de año hidrológico y por lo tanto se diferenciaron en total 20 capas asignadas a 20 años hidrológicos. En la primera capa, sin embargo, no se diferencian bien las acumulaciones recientes, por lo que no se asignarán valores para cada año. Para

convertir los espesores de cada capa a metros equivalentes de agua, se asumió la misma densidad promedio de los pozos más profundos que fueron empleadas para determinar el balance anual en las Torres 1 y 2, la que alcanzó a 0.45 gr/cm^3. Se estima que en los primeros 20 metros del registro no se produce una fuerte compactación por lo que las densidades están principalmente controladas como en la superficie, por el monto de nieve depositada, el viento y en particular la recongelación.

En la Tabla 7.6 se resumen los espesores promedios de las primeras 20 capas detectadas, con su asignación por años hidrológicos. Ahí se ve cierta variabilidad con un ciclo de mayores acumulaciones entre los años 2001 y 2006. El promedio de la serie es de 0.34 m eq a para el periodo y el balance acumulado en el periodo 1994/95 a 2012/13 es de 6.51 m eq. a.

Tabla 7.6 Balance de masa (m eq. a) obtenidos con radar a 1298 m snm (Greve) y a 2600 m snm en Pío XI [*Schwikowski et al.*, 2013]**.**

Capa	Promedio [m]	Año hidrológico	Greve	Pío XI
1	1.32	2013-2014	*	
2	0.63	2012	0.28	
3	0.79	2011	0.36	
4	0.69	2010	0.31	
5	0.60	2009	0.27	
6	0.71	2008	0.32	
7	0.66	2007	0.30	
8	0.91	2006	0.41	
9	0.84	2005	0.38	
10	1.16	2004	0.52	6
11	0.75	2003	0.34	6.5
12	1.08	2002	0.49	5.8
13	0.69	2001	0.31	7.1
14	0.58	2000	0.26	3.4
15	0.63	1999	0.28	
16	0.49	1998	0.22	
17	0.64	1997	0.29	
18	0.79	1996	0.36	
19	0.77	1995	0.35	
20	1.05	1994	0.47	

*A la primera capa no se le asigna año hidrológico por ser difícil diferenciar el primer metro en el registro de radar.

Se ha incluido también los valores de acumulación anual determinados por Schwikowski et al. [2013] en el glaciar Pío XI a 2600 m snm. Al comparar los valores de ambas series, se concluye que los valores de Pío XI tienen un orden de magnitud superior a los de Greve, lo que es entendible porque su localización está a más de 1300 metros sobre el sitio de medición de radar en Greve. Además, Pío XI está cerca de 50

km al sur de Greve y en una posición mucho más expuesta a los vientos del oeste, todo lo cual explica las mayores precipitaciones y acumulaciones que allí se dan. No obstante lo anterior, la fluctuación entre ambas series en el periodo común (2005-2001) sigue un patrón similar, lo que podría indicar que hay cierta correspondencia entre ambas series (Figura 7.22), lo que también se manifiesta grosso modo con el modelo de balance de masa elaborado para el glaciar Chico por Rivera (2004).



Figura 7.22 Estimación de serie de balance de masa anual con radar en Torre 2 y comparación con serie de balance de masa en el testigo del Pío XI [*Schwikowski et al.*, 2013], modelo para glaciar Chico [*Rivera*, 2004] y balance anual 2015-2016 en Torre 2.

7.5.5 Velocidades de hielo

Las torres nivométricas instaladas en tres distintos puntos en la meseta de CHS fueron posicionadas al momento de su instalación mediante GPS por método diferencial [*Seeber*, 1993]. Las condiciones meteorológicas durante el período de operación impidieron el mantenimiento de las torres nivométricas. Durante la última a campaña a terreno de junio-julio de 2016 las torres se encontraron inclinadas o derribadas producto del viento y la nieve. Las velocidades derivadas en los tres distintos puntos donde fueron instaladas torres nivométricas se mantienen bajo el umbral de 0.5 km a^{-1}, con rangos de velocidad promedio de: 0 km a^{-1}, 0.4 km a^{-1} y 0.4 km a^{-1} para las torres 1, 2 y 3, respectivamente [*Mouginot and Rignot*, 2015].

7.6 Discusión y conclusiones

Los montos de precipitación en la meseta de Campo de Hielo Sur (CHS) han sido poco observados directamente debido a la dificultad que representan las extremas condiciones meteorológicas del invierno austral en la zona (Tabla 7.7).

Tabla 7.7 Acumulación de nieve anual (m eq. a./a) en el Campo de Hielo Sur.

Glaciar	Altitud (m snm.)	m eq. a./a	Referencia
Gorra Blanca Norte	2300	0.97	[*Schwikowski et al.*, 2006]
Moreno	2680	1.2	[*Aristarain and Delmas*, 1993]
Tyndall	1756	14.4	[*Shiraiwa et al.*, 2002]
Chico	1440	0.57	[*Rivera*, 2004]
Pío XI	2600	5.8	[*Schwikowski et al.*, 2013]
O'Higgins	1214	0.34*	Este estudio

*promedio de serie 1994-2012 obtenida con radar

Sin embargo las estimaciones existentes confirman el fuerte contraste longitudinal (Figura 7.23) y gradiente vertical de precipitaciones en la zona (Figura 7.24), lo que es ratificado por los datos obtenidos en este proyecto en el plateau (Torres 1 y 2).

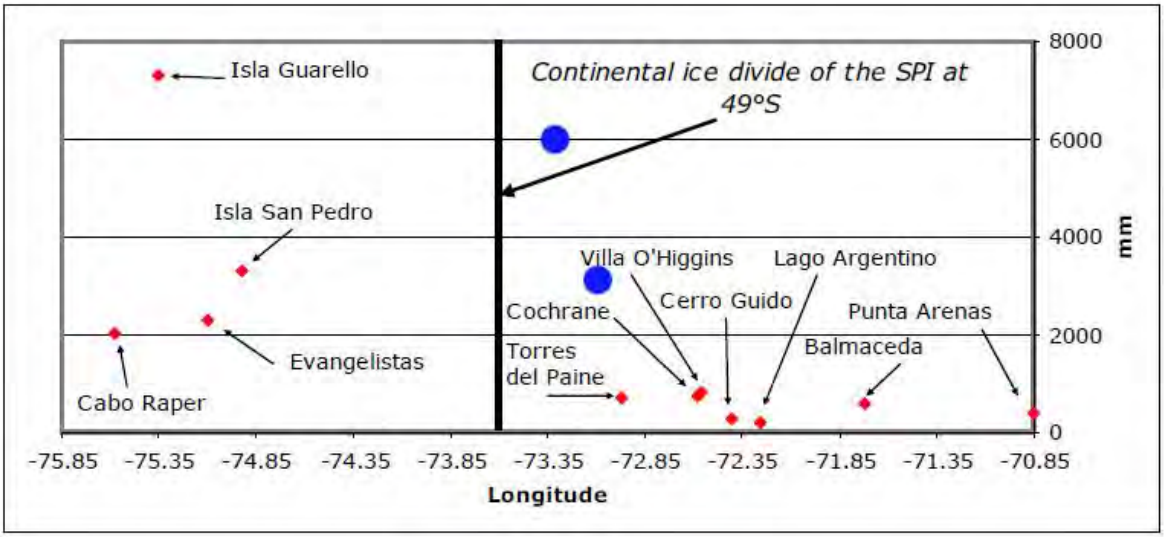


Figura 7.23 Contraste pluviométrico occidente-oriente en CHS con datos obtenidos en este proyecto para Torres 1 (punto azul superior) y Torre 2 (punto azul inferior).

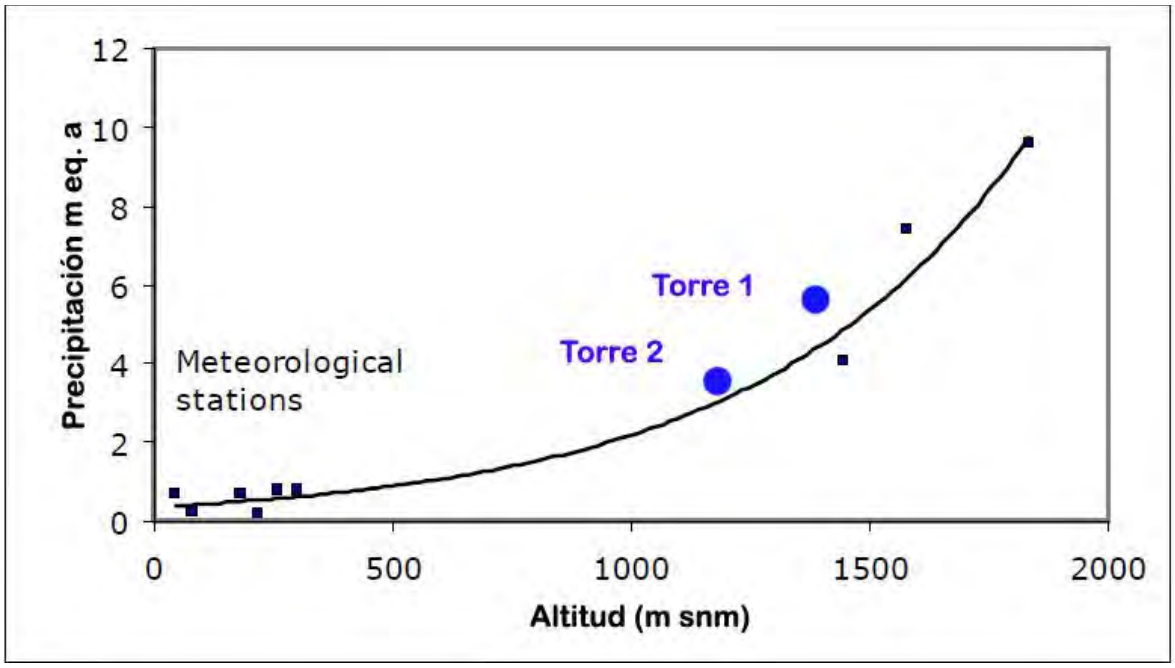


Figura 7.24 Precipitación estimada para distintas alturas del CHS (Rivera et al, 2004) comparados con valores calculados para el año 2015-2016 en Torres 1 y 2 de este proyecto.

Por otro lado, los modelos climáticos y/o de re-análisis no logran representar de manera adecuada la precipitación debido a que la resolución espacial es gruesa, generando una suavización de la topografía y por lo tanto disminuyendo el efecto orográfico que los Andes ejerce en los flujos atmosféricos.

Por ejemplo, el modelo NCEP-DOE R2, muestra para la zona, precipitaciones menores a las observadas por el Geonor instalado en la estación meteorológica Témpano en periferia (Figura 7.25) especialmente en los eventos de mayor precipitación. Por lo que tampoco es representativo de los montos de precipitación en la zona de la meseta que se espera sean mayores a los registrados en la periferia de CHS. Es importante indicar que a pesar de la subestimación de NCEP-DOE, existe una relación positiva en la variabilidad interdiaria, pero especialmente en la ocurrencia de eventos de precipitación. En este sentido la corrección de datos de modelos con gradientes de precipitación observados puede ser una buena forma de estimar, a futuro, la precipitación en la zona de la meseta de CHS.

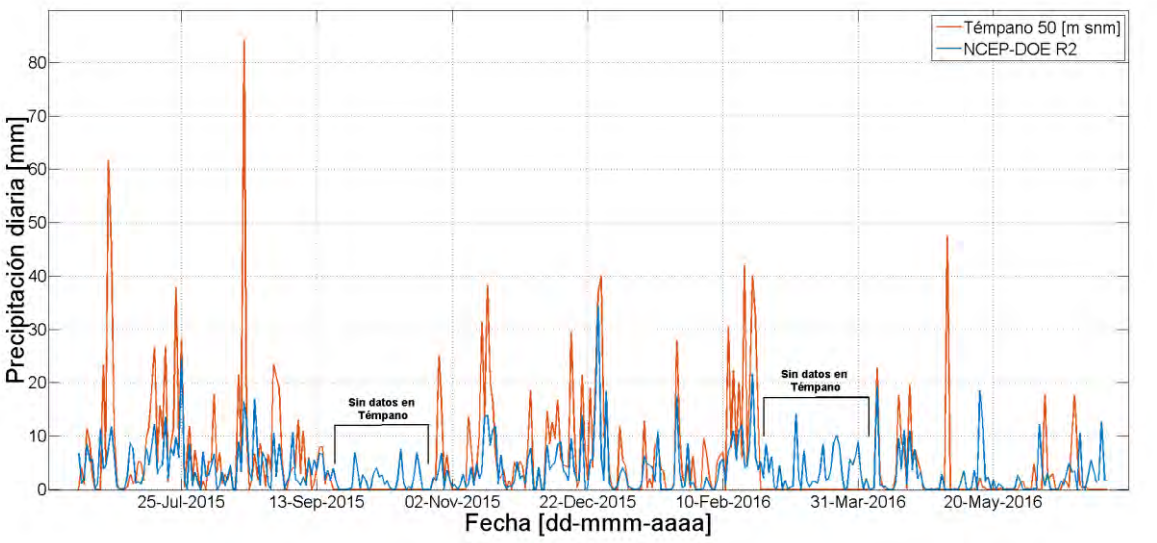


Figura 7.25 serie de tiempo de precipitación observada (Estacion AWS Témpano) y obtenida a partir del re-analisis NCEP-DOE R2 (http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis2.html).

En los últimos años se han desarrollado investigaciones que buscan mejorar la resolución espacial de los modelos con el objetivo de lograr una mejor representación de los montos de precipitación en la zona. Lenaerts et al. [2014] utilizó un modelo regional de alta resolución (RACMO2, 5.5 km) con el objetivo de describir la climatología de CHS (1979-2012). Los máximos montos de precipitación para la zona norte de CHS se observan en la fachada occidental con montos del orden de 5 m e.a. y máximos del orden de 10 m e.a. La precipitación rápidamente decae hacia la fachada oriental con montos en torno a 1 m e.a. (Figura 7.26). De ser valores realistas, el gradiente en Patagonia seria uno de los más extremos a nivel mundial (Laenerts et al., 2014; Smith y Evans, 2007).

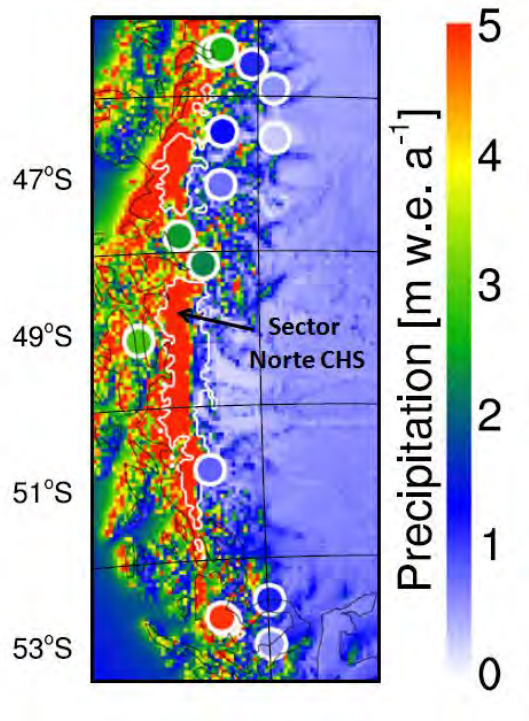


Figura 7.26 Precipitación sobre Patagonia obtenida con modelo RACMO2. Fuente: Laenerts et al. (2014)

Por otro lado, Schaefer et al. (2015) usando el modelo WRF forzado con datos de re análisis NCEP-NCAR para el periodo 2005-2011 y luego usando técnicas estadísticas, obtuvieron datos de mejor resolución espacial para el periodo 1975-2011, con el objetivo de estimar el balance de masa en CHS. A partir de estos datos se estimó que la acumulación específica promedio en CHS en el periodo 1975-2011 fue de 4.87 m e.a. a^{-1}, de los cuales el 59% corresponde a precipitación sólida, obteniéndose una acumulación de nieve promedio de 8.36 m, que es un poco mayor a los 7 m estimados previamente por Escobar et al. (1992).

Una mejor estimación de acumulación de nieve sería posible si se tienen mediciones de densidad en profundidad, por ejemplo derivados de un

testigo de hielo y así además contrastar las capas detectadas con el radar frente a las obtenidas con el testigo de nieve.

En resumen, las estimaciones de acumulación de nieve en el CHS, parecen indicar que la acumulación anual se encuentra en general en el orden de los ~ 5 m e.a., pero se han identificado zonas específicas donde los montos estimados superan los 10 m e.a. (por ejemplo modelo RACMO2, Laenerts et al., 2014), valor que no obstante deben ser tomado con precaución debido a que la resolución de este modelo aún es insuficiente para resolver efectos de precipitación orográfica.

8 Implementación y monitoreo hidro-meteorológico en los Glaciares de estudio.

8.1 Resumen

En este capítulo se presentan los resultados de la implementación y mantención de la red de monitoreo hidro-meteorológico de la periferia del CHS, de sensores para medir presión de agua en fiordos Jorge Montt y Témpano, y en lago O'Higgins, estaciones meteorológicas en la meseta del CHS y cámaras fotográficas. Se incluyen los detalles de instalación por estación, los sensores incluidos, las configuraciones empleadas y el protocolo seguido en la instalación, puesta en funcionamiento y mantención.

8.2 Instalaciones y mantenimientos de las estaciones hidro-meteorológicas

8.2.1 Glaciar Jorge Montt

La estación meteorológica Jorge Montt se encuentra ubicada en las coordenadas 48°15'13'' S, 73°27'35.6'' O, a 193 msnm (Figura 8.1). Instalada en el presente proyecto por el Centro de Estudios Científicos (CECs) y perteneciente a la red de estaciones meteorológicas de la Dirección General de Aguas (DGA). Esta estación se encuentra actualmente integrada por siete sensores, un sistema de energía constituido por paneles solares y baterías, además de un sistema de transmisión mediante la constelación de satélites GOES. En la Tabla 8.1 se muestra el detalle de todos los sensores y equipos que la conforman.

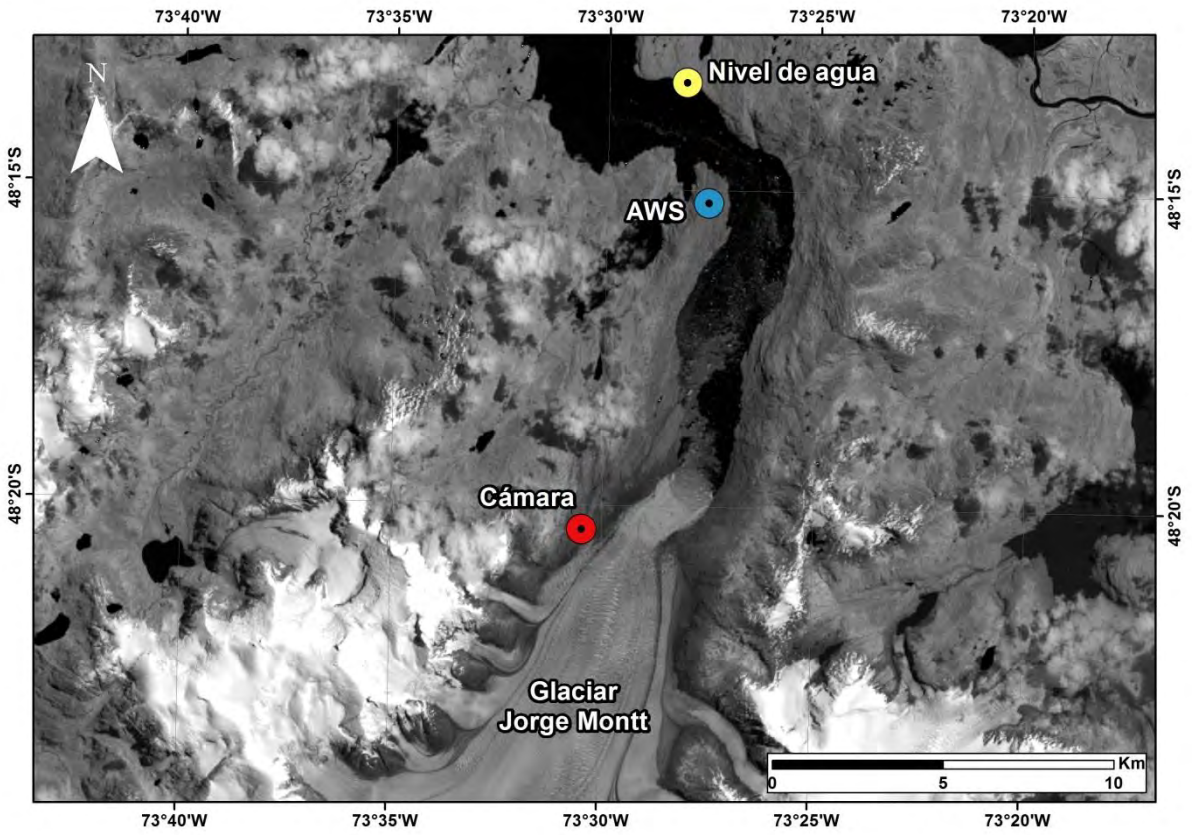


Figura 8.1 Localización de la estación meteorológica (AWS), nivel de agua y sistema de cámara fija en las proximidades del Glaciar Jorge Montt.

Tabla 8.1 Componentes de la estación meteorológica Jorge Montt

Sensor	**Variable**	**Nivel**
Temperatura pasiva *Young* 41382VC	Temperatura del aire y humedad relativa	2 m
Anemómetro RM *Young* 5103	Velocidad y dirección del viento	2 m
Temperatura aspirada *Young* 41382VC	Temperatura del aire y humedad relativa	2 m
CGR3	Radiación incidente de onda larga	2 m
CMP3	Radiación incidente de onda corta	2 m
SR50A	Altura de nieve	2 m
Vaisala PTB110	Presión atmosférica	1.5 m (Caja *Campbell*)
Pluviómetro *Young* 52203	precipitación	1.5 m
Accesorios	**Objetivo**	**Nivel**
Datalogger CR1000	Programa y almacenamiento	1.2 m (Caja *Campbell*)
Antena transmisión *Yagi*	Transmisión	2 m
Antena GPS	Ubicación	2 m
Transmisor *Campbell* Tx312	Transmisión	1.2 m (Caja *Campbell*)
Panel solar (2 de 10 y 20W)	Energización	1.8 m
Baterías (2 de 100 AH)	Energización	0 m (Caja *Pelican*)
Reguladores de voltaje (2)	Energización	0 m (Caja *Pelican*)
Caja *Campbell* 14/16	Protección intemperie	1.2 m
Caja *Pelican* 1610	Protección intemperie	0 m
t.m.f.p 1,5"	Canalización de cables	0 m

Entre los días 1 y 2 de mayo del 2014 se realizó la instalación de esta nueva estación meteorológica automática (AWS) cerca del frente del Glaciar Jorge Montt. El sitio fue seleccionado por las óptimas condiciones de roca y el amplio espacio para la instalación de los equipos e instrumentos de medición. En primer lugar, se instalaron dos mástiles, fijados a roca con pernos de anclaje y un puente de adherencia epóxico,

quedando ambos a 2.2 metros de distancia. Adicionalmente se instaló una caja *Pelican* 1610 a través de cáncamos de anclaje y cables de acero. Luego fueron fijados al primer mástil una caja *Campbell* 14/16, dos paneles solares de 10 y 20 watts, una antena de transmisión y una antena GPS. Al segundo mástil tipo "T" a una altura aproximada de 2 metros fueron fijados 6 sensores para medir temperatura y humedad, dirección y velocidad del viento, radiación y distancia. El detalle de cada sensor se encuentra en la Tabla 8.1. Al interior de la caja *Pelican* 1610 fueron instaladas dos baterías de gel 12V 100Ah c/u y dos reguladores de voltaje. El cableado de los sensores, paneles y baterías fueron canalizados a través de tubería metálica flexible 1.5" hasta la caja *Campbell* 14/16 en donde se instaló un *datalogger* CR3000, un transmisor TX312 y un sensor de presión barométrica. Todos los sensores fueron conectados al *datalogger* CR3000 según diagrama de conexión y previamente configurado para la lectura de todos los sensores instalados, el sistema de transmisión se conectó según los identificadores y parámetros entregados por la Unidad de Glaciología y Nieves de la Dirección General de Aguas (UGN) y la antena se orientó según los cálculos basados en la coordenada de ubicación, altitud y la declinación magnética, con un ángulo de elevación de 37.8° y un azimut de 354°, comprobándose posteriormente el día 10 de mayo del 2014 la transmisión efectiva de los datos.

En la Figura 8.2 se observan los trabajos de instalación y descarga de datos de la AWS Glaciar Jorge Montt, con los sensores, sistema de energía y transmisión montadas en los dos mástiles y caja *Pelican* 1610.



Figura 8.2 Instalación y mantenimiento de la estación meteorológica Jorge Montt

El sensor de precipitación *Young* 52203 fue recibido sin la base de soporte, ni la pantalla protectora para viento, por lo tanto, se tomó la decisión de no realizar esta instalación, ya que el sensor indicaría datos erróneos al no presentar todas las partes que lo conforman.

El día 27 de septiembre del 2014 se realizó una segunda visita a la estación Jorge Montt para descargar datos, terminar instalaciones pendientes y realizar el mantenimiento respectivo de todos los equipos que la conforman. En primer lugar, se revisó el estado de la estructura de la estación, sensores y caja *Pelican* 1610, encontrándose todo en buen estado. Se remplazó la unidad colectora de datos (*datalogger*) CR3000 por un CR1000 en base a los requerimientos de la Unidad de

Glaciología y Nieves de la DGA, en virtud de la estandarización de la red de monitoreo meteorológico. Adicional a esto, se removió el sensor de altura de nieve SR50A, ya que por la ubicación lo hacía innecesario, se reinstaló el sensor de temperatura y humedad relativa y fue instalada una resistencia de precisión al sensor de radiación de onda larga para subsanar el valor de temperatura interna del mismo.

El día 14 de octubre del 2014 se instaló el sensor de precipitación (pluviómetro *Young* 52203), fijando su estructura a roca y conectado al *datalogger* de la estación (Figura 8.3).



Figura 8.3 Instalación del pluviómetro *Young* 52203 en la estación meteorológica Jorge Montt

Las posteriores visitas a la AWS Jorge Montt realizadas bianual por CECs (2015-2016) en donde se descargaron datos y realizado el mantenimiento de los equipos en general, muestran un correcto funcionamiento de todos los sensores, por tanto, no fue necesario realizar modificaciones adicionales en la estación.

8.2.2 Glaciar Témpano

La estación meteorológica Glaciar Témpano se encuentra ubicada en las coordenadas 48°42'8.70" S, 73°59'16.56" O, a 50 msnm (Figura 8.4). Instalada previo al proyecto y perteneciente a la red de estaciones meteorológicas de la Dirección General de Aguas (DGA). Esta estación se encuentra actualmente integrada por siete sensores, un sistema de energía constituido por paneles solares y baterías, además de un sistema de transmisión mediante la constelación de satélites GOES. En la Tabla 8.2 se muestra el detalle de todos los sensores y equipos que la conforman.

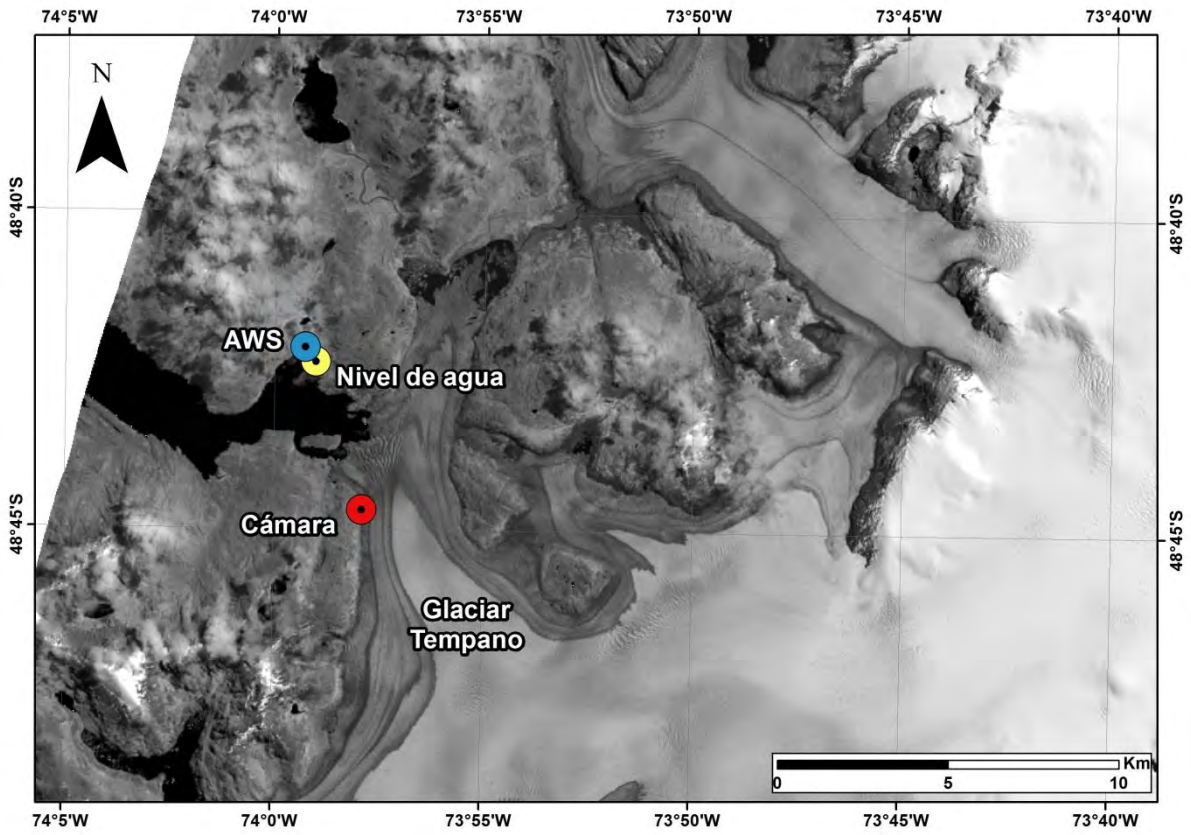


Figura 8.4 Localización de la estación meteorológica (AWS), nivel de agua y sistema de cámara fija en las proximidades del Glaciar Témpano

Tabla 8.2 Componentes de la estación meteorológica Glaciar Témpano

Sensor	Variable	Nivel
Temperatura pasiva *Young* 41382VC	Temperatura del aire y humedad relativa	2 m
Anemómetro RM *Young* 5103	Velocidad y dirección del viento	2 m
Temperatura aspirada *Young* 41382VC	Temperatura del aire y humedad relativa	2 m
CGR3	Radiación incidente de onda larga	2 m
CMP3	Radiación incidente de onda corta	2 m
Vaisala PTB110	Presión atmosférica	1.5 m (Caja

		Campbell)
Pluviómetro *Young* 52203	precipitación	1.5 m
Accesorios	**Objetivo**	**Nivel**
Datalogger CR3000	Programa y almacenamiento	1.2 m (Caja *Campbell*)
Antena transmisión *Yagi*	Transmisión	2 m
Antena GPS	Ubicación	2 m
Transmisor *Campbell* Tx312	Transmisión	1.2 m (Caja *Campbell*)
Panel solar (2 de 20W)	Energización	1.5 m
Baterías (2 de 100 AH)	Energización	0 m (Caja *Pelican*)
Reguladores de voltaje (2)	Energización	0 m (Caja *Pelican*)
Caja *Campbell* 14/16	Protección intemperie	1.2 m
Caja *Pelican* 1610	Protección intemperie	0 m
t.m.f.p 1.5"	Canalización de cables	0 m

El día 27 de abril del 2015 se realizó el primer mantenimiento por parte del CECs a la estación meteorológica Glaciar Témpano, donde no se pudo acceder a la unidad colectora de datos, ya que no se obtuvo la llave para acceder al interior de la caja protectora, por lo cual se realizó una inspección visual de todos los sensores y estructuras, encontrándose físicamente todo en buen estado.

El día 17 de septiembre del 2015 se realizó una segunda visita a la estación meteorológica Glaciar Témpano, cuando si se tuvo acceso a la unidad colectora de datos y así poder realizar la descarga de datos respectiva. Adicionalmente, se inspeccionó el funcionamiento de los sensores y equipamiento en general, encontrándose todo en perfectas condiciones (Figura 8.5).



Figura 8.5 Sensores y equipos de la estación meteorológica Glaciar Témpano

Luego de realizar el chequeo y mantenimiento general de la estación, se procedió al remplazo de la estructura del pluviómetro según requerimientos de la Unidad de Glaciología y Nieves de la DGA, en virtud de la estandarización de la red de monitoreo meteorológico (Figura 8.6). Para esto fue necesario retirar cinco bases de cemento que sustentaban la estructura antigua y de esta forma despejar la roca. En cuanto a la nueva estructura, ésta fue fijada a la roca con pernos de anclaje y un puente de adherencia epóxico, luego se montó el pluviómetro y se chequeó los parámetros de funcionamiento en el *datalogger*. La

estructura reemplazada, maderas y cemento fueron retirados del lugar con helicóptero.



Figura 8.6 Instalación de nueva estructura para el sensor de precipitación en la estación Glaciar Témpano

El día 02 de julio del 2016 se realizó una nueva visita a la estación meteorológica Glaciar Témpano, donde se procedió en primer lugar a realizar una inspección visual de todos los sensores, estructuras y equipamiento en general de la estación, encontrándose físicamente todo en buen estado. Luego se intentó conectar al *datalogger* CR3000 para realizar la respectiva descarga de datos, sin embargo, no se logró obtener comunicación entre PC y *datalogger* a pesar de realizar distintas configuraciones en ambos equipos. A consecuencia de esto, el día 14 de julio del mismo año un grupo de profesionales del CECs se dirigió hasta

el lugar para reemplazar el *datalogger* CR3000 por un equipo nuevo, cargando a éste el programa que había sido descargado en la anterior campaña. Se confirmó la recepción de los datos de transmisión y el correcto funcionamiento de todos los sensores de la estación a través de la página dgasatel.mop.cl.

8.2.3 Glaciar O'Higgins

La estación meteorológica Glaciar O'Higgins, perteneciente a la red de estaciones meteorológicas de la Dirección General de Aguas (DGA) fue instalada antes del inicio de este proyecto, en las coordenadas 48°55'44.64" S, 73°08'20.46" O, a 310 msnm (Figura 8.7). Esta estación se encuentra actualmente integrada por siete sensores, un sistema de energía constituido por paneles solares y baterías, además de un sistema de transmisión mediante la constelación de satélites GOES. En la Tabla 8.3 se muestra el detalle de todos los sensores y equipos que la conforman.

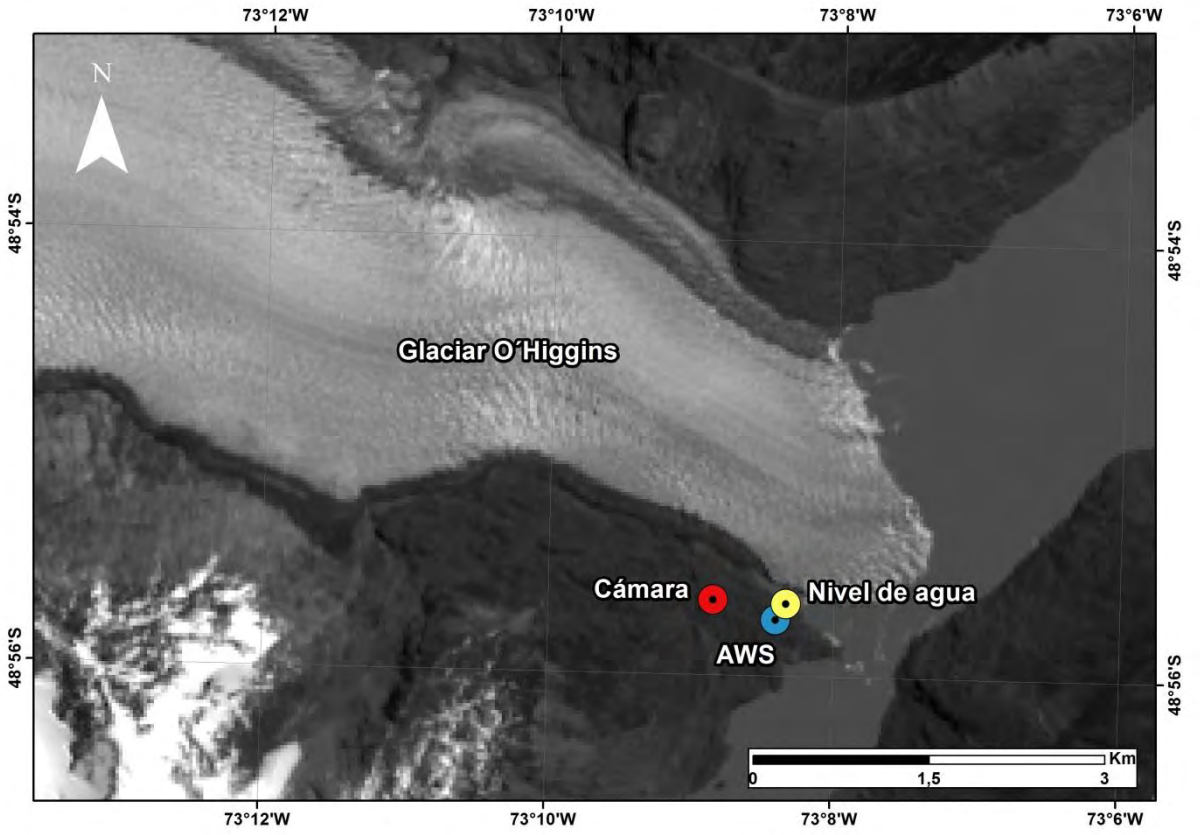


Figura 8.7 Localización de la estación meteorológica (AWS), nivel de agua y sistema de cámara fija en las proximidades del Glaciar O'Higgins

Tabla 8.3 Componentes de la estación meteorológica Glaciar O'Higgins

Sensor	Variable	Nivel
Temperatura pasiva *Young* 41382VC	Temperatura del aire y humedad relativa	2 m
Anemómetro RM *Young* 5103	Velocidad y dirección del viento	2 m
Temperatura aspirada *Young* 41382VC	Temperatura del aire y humedad relativa	2 m
CGR3	Radiación incidente de onda larga	2 m
CMP3	Radiación incidente de onda corta	2 m
Vaisala PTB110	Presión atmosférica	1.5 m (Caja

		Campbell)
Pluviómetro *Young* 52202	precipitación	1.5 m
Accesorios	**Objetivo**	**Nivel**
Datalogger CR1000	Programa y almacenamiento	1.2 m (Caja *Campbell*)
Antena transmisión *Yagi*	Transmisión	2 m
Antena GPS	Ubicación	2 m
Transmisor *Campbell* Tx312	Transmisión	1.2 m (Caja *Campbell*)
Panel solar (2 de 20W)	Energización	1.8 m
Baterías (2 de 100 AH)	Energización	0 m (Caja *Pelican*)
Reguladores de voltaje (2)	Energización	0 m (Caja *Pelican*)
Caja *Campbell* 14/16	Protección intemperie	1.2 m
Caja *Pelican* 1610	Protección intemperie	0 m
t.m.f.p 1.5"	Canalización de cables	0 m

El día 8 de octubre del 2014 se visitó la estación meteorológica Glaciar O'Higgins donde se realizó una inspección visual de los sensores y estructuras que conforman la estación, encontrándose todo en buen estado a excepción de la estructura del sensor de precipitación (pluviómetro *Young* 52202) que había perdido una de las cuatro secciones de la pantalla de viento.

El día 26 de abril del 2015 se realizó una nueva visita a la estación Glaciar O'Higgins, donde se descargaron los datos desde el *datalogger* CR1000. Adicionalmente, se inspeccionó el funcionamiento de los sensores y equipamiento en general, encontrándose todos los sensores dentro de los rangos normales de funcionamiento y físicamente los equipos y estructuras en buen estado (Figura 8.8). Además, fue instalada una nueva pantalla de viento a la estructura del sensor de precipitación a consecuencia de la perdida de una de sus secciones.

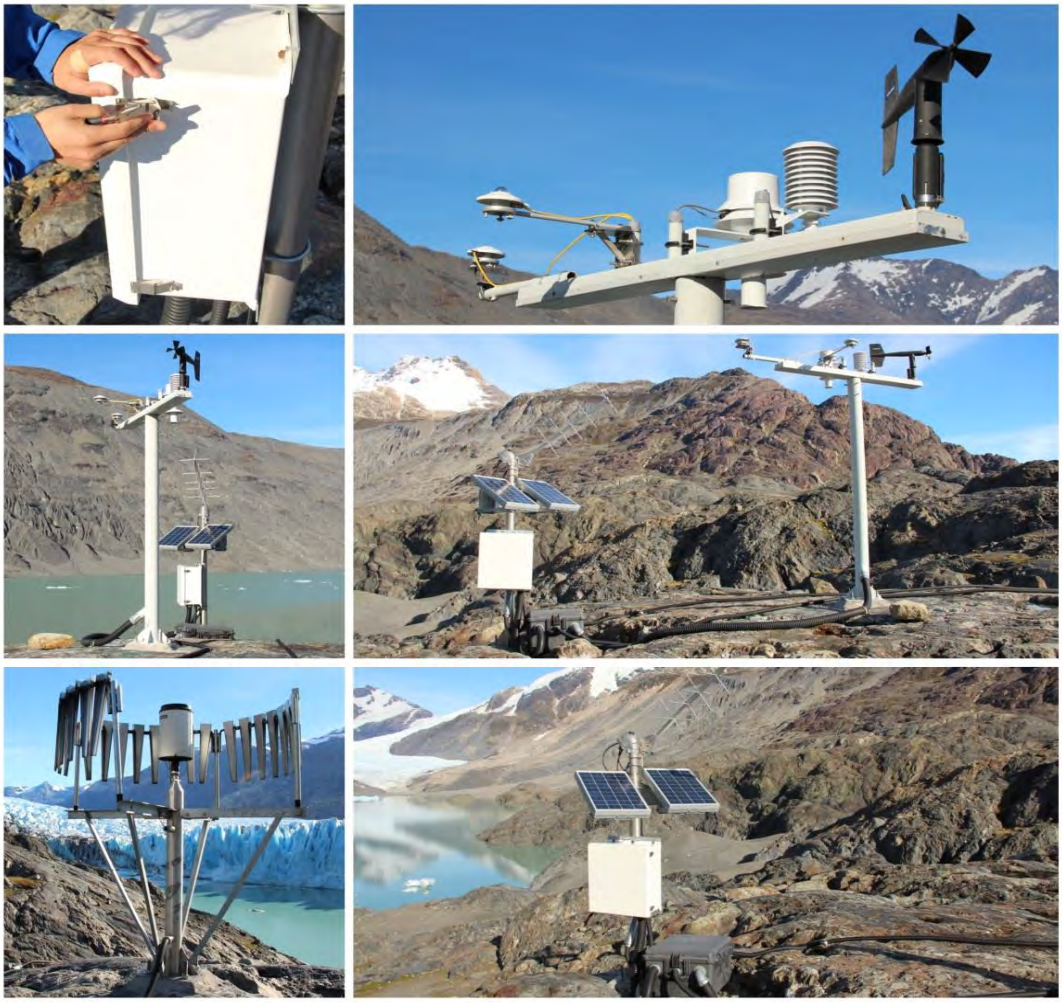


Figura 8.8 Sensores y equipos de la estación meteorológica Glaciar O'Higgins

Entre los días 1 y 2 de octubre del 2015 se realizaron dos visitas a la estación, donde se realizó el mantenimiento general de los equipos y la descarga de datos respectiva. En cuanto al funcionamiento de los sensores, estos se encontraban todos operativos y en buen estado a excepción del pluviómetro que se encontraba con el valor de precipitación acumulada fijo en "7999" informado oportunamente por el inspector fiscal de DGA. Para solucionar esto, fue necesario reiniciar el programa en el *datalogger* CR1000, de manera tal que el valor

entregado se iniciara en "0". Adicionalmente se encontró un cable cortado del mismo sensor, el cual fue reparado en el mismo momento.

El día 1 de julio del 2016 se realizó nuevamente una visita a la estación, en donde se logró descargar los datos de los sensores satisfactoriamente y corroborando el funcionamiento correcto de cada uno de éstos. Adicionalmente, se realizó una inspección visual del estado de las estructuras, baterías y el equipamiento en general los cuales se encontraban físicamente en buen estado.

8.3 Instalaciónes y mantenimientos de los sistemas de nivel de agua

8.3.1 Glaciar Jorge Montt

La estación del sistema de nivel de agua del Glaciar Jorge Montt se encuentra ubicada en las coordenadas 48°13'19.4" S, 73°28'10" O, a 0 msnm (Figura 8.1). Esta fue instalada en el presente proyecto por el Centro de Estudios Científicos (CECs) y perteneciente a la red de estaciones de la Dirección General de Aguas (DGA). La estación está compuesta por un sensor de presión (KPSI 500 Measurement Specialties), una unidad colectora de datos (*datalogger* CR850) y un sistema de energía constituido por un panel solar de 10W y una batería de 12V 26Ah. En la Tabla 8.4 se muestra el detalle de todos los equipos que la conforman.

Tabla 8.4 Componentes de la estación de nivel de agua del Glaciar Jorge Montt

Sensor	**Variable**	**Nivel**
KPSI 500 Measurement Specialties	Nivel de agua	-
Accesorios	**Objetivo**	**Nivel**
Datalogger CR850	Programa y almacenamiento	0 m Caja *Pelican* 1450
Panel solar de 10W	Energización	0 m
Batería de 12V 26 AH	Energización	0 m Caja *Pelican* 1450
Regulador de voltaje	Energización	0 m Caja *Pelican* 1450
Estructura de acero galvanizado	Canalización del sensor	-
t.m.f.p 1"	Canalización de cables	0 m

El día 6 de mayo del 2014 se realizó la instalación de la estación de nivel de agua cercana al frente del Glaciar Jorge Montt, en una roca con fácil acceso y protegida de los témpanos que se desprenden constantemente, reduciendo de esta manera el daño al sensor. La estructura fue construida previamente en Valdivia de acuerdo a las especificaciones entregadas por la Unidad de Glaciología y Nieves de la DGA (Figura 8.9), la que fue aferrada a roca con pernos de anclaje y un puente de adherencia epóxico, quedando de posición vertical con la sección inferior bajo el agua. El sensor de presión fue insertado y fijado dentro de la estructura para evitar daños físicos y el desplazamiento por oleajes y mareas (Figura 8.10). Adicionalmente se instaló una caja *Pelican* 1450 y el sistema de energía (panel solar de 10W y batería 12V 26Ah) con la unidad de almacenamiento de datos (*datalogger* CR850), la cual fue programada para la conexión del sensor KPSI 500 por medio de la norma SDI-12, realizando lecturas cada 1 minuto y almacenamiento de muestras, promedios, máximos y mínimos cada 10 minutos.

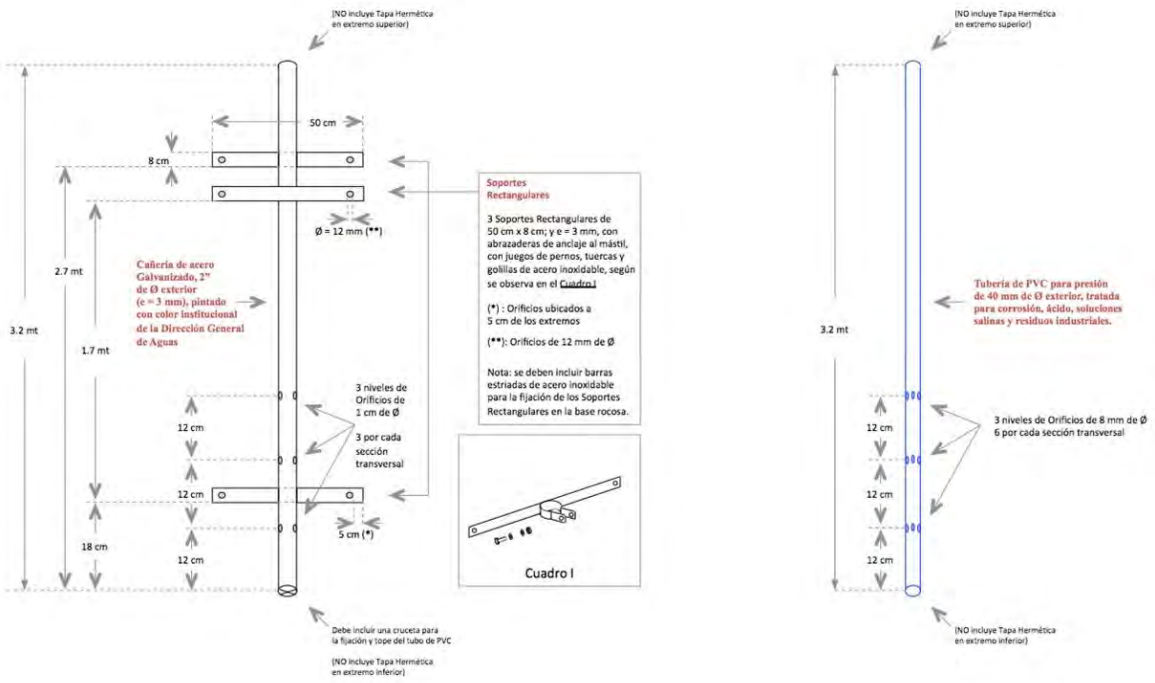


Figura 8.9 Especificaciones estructurales del sistema de fijación del sensor de nivel de agua



Figura 8.10 Instalación de la estación de nivel de agua en el fiordo del Glaciar Jorge Montt

El día 8 de octubre del 2014 se realizó la primera visita y mantenimiento a la estación de nivel de agua, cuando se descargaron los datos del *datalogger* CR850, encontrándose con el sensor operando dentro de los rangos normales de funcionamiento. Adicionalmente se realizó una inspección visual de la estructura y el sistema de energía, los cuales se encontraban en óptimas condiciones. Se instaló además una tubería metálica flexible de 1″ desde la caja contenedora del *datalogger* CR850 hasta la estructura, con el fin de proteger el cable del sensor KPSI 500.

En las visitas realizadas posteriormente a esta estación entre las campañas 2015 y 2016 se descargaron datos y se realizó el mantenimiento del sistema en general, mostrando un correcto funcionamiento del sensor de nivel, sistema de energía y estructuras en

óptimas condiciones, por lo que no fue necesario realizar modificaciones adicionales en la estación.

8.3.2 Glaciar Témpano

La estación del sistema de nivel de agua del Glaciar Témpano se encuentra ubicada en las coordenadas 48°42'22.4" S, 73°59'1.1" O, a 0 msnm (Figura 8.4). Fue instalada por el Centro de Estudios Científicos (CECs) en el presente proyecto, y perteneciente a la red de estaciones de la Dirección General de Aguas (DGA). Está integrada actualmente por un sensor de presión (OTT Hydromet Pressure Probe PLS), una unidad colectora de datos (*datalogger* CR800) y un sistema de energía constituido por un panel solar de 10W y una batería de 12V 26Ah. En la Tabla 8.5 se muestra el detalle de todos los equipos que la conforman.

Tabla 8.5 Componentes de la estación de nivel de agua del Glaciar Témpano

Sensor	**Variable**	**Nivel**
OTT Hydromet Pressure Probe PLS	Nivel de agua	-
Accesorios	**Objetivo**	**Nivel**
Datalogger CR800	Programa y almacenamiento	0 m Caja *Pelican* 1450
Panel solar de 10W	Energización	0 m
Batería de 12V 26 AH	Energización	0 m Caja *Pelican* 1450
Regulador de voltaje	Energización	0 m Caja *Pelican* 1450
Estructura de acero galvanizado	Canalización del sensor	-
t.m.f.p 1"	Canalización de cables	0 m

El día 7 de mayo del 2014 se realizó la instalación de la estación de nivel de agua cercana al frente del Glaciar Témpano, en una roca con fácil acceso y protegida de los témpanos que se desprenden constantemente,

reduciendo de esta manera el daño al sensor. La estructura fue construida previamente en Valdivia de acuerdo a las especificaciones entregadas por Unidad de Glaciología y Nieves de la DGA (Figura 8.9), la que se aferró a roca con pernos de anclaje y un puente de adherencia epóxico, quedando de manera vertical con la sección inferior bajo el agua. El sensor de presión fue insertado y fijado dentro de la estructura para evitar daños físicos y el desplazamiento por oleajes y mareas (Figura 8.11). Adicionalmente se instaló una caja *Pelican* 1450 y el sistema de energía (panel solar de 10W y batería12V 26Ah) con la unidad de almacenamiento de datos (*datalogger* CR850), la cual fue programada para la conexión del sensor OTT PLS por medio de la norma SDI-12, realizando lecturas cada 1 minuto y almacenamiento de muestras, promedios, máximos y mínimos cada 10 minutos.



Figura 8.11 Instalación de la estación de nivel de agua en el fiordo del Glaciar Témpano

El día 19 de octubre del 2014 se realizó la primera visita y mantenimiento a la estación de nivel de agua, cuando se procedió a la descarga de datos, encontrándose con el *datalogger* CR850 con problemas en el encendido de la pantalla. Sin embargo, los datos fueron descargados satisfactoriamente y se corroboró la operación del sensor dentro de los rangos normales de funcionamiento. Adicionalmente, se realizó una inspección visual de la estructura y el sistema de energía, los cuales se encontraban en óptimas condiciones. Se instaló además una tubería metálica flexible de 1" desde la caja contenedora del *datalogger* CR850 hasta la estructura, con el fin de proteger el cable del sensor OTT PLS.

El día 27 de abril del 2015 se realizó una nueva visita a la estación, cuando se procedió a la descarga de datos, encontrándose con problemas en el conector RS232 del *datalogger* CR850. A consecuencia de esto se procedió al reemplazo del equipo por un *datalogger* CR800, configurándolo con el mismo programa. La descarga de los datos se realizó una vez solucionado el problema en el laboratorio, donde se apreció un correcto funcionamiento del sensor. Adicionalmente, se realizaron las inspecciones generales del sistema, encontrándose todo en buen estado.

En las visitas realizadas posteriormente a esta estación entre las campañas 2015 y 2016 se descargaron datos y realizó el mantenimiento del sistema en general, el que mostró un correcto funcionamiento del sensor de nivel, el sistema de energía y estructuras en óptimas condiciones, por lo que no fue necesario realizar modificaciones adicionales en la estación.

8.3.3 Glaciar O'Higgins

La estación del sistema de nivel de agua del Glaciar O'Higgins se encuentra ubicada en las coordenadas 48°55'40.08" S, 73°8'20.46" O, a 250 msnm (Figura 8.7). Fue instalada con anterioridad a este proyecto y pertenece a la red de estaciones de la Dirección General de Aguas (DGA). Está compuesta por un sensor de presión (OTT Hydromet Pressure Probe PLS), una unidad colectora de datos (*datalogger* CR850) y un sistema de energía constituido por un panel solar de 10W y una batería de 12V 26Ah. En la Tabla 8.6 se muestra el detalle de todos los equipos que la conforman.

Tabla 8.6 Componentes de la estación de nivel de agua del Glaciar O'Higgins

Sensor	**Variable**	**Nivel**
OTT Hydromet Pressure Probe PLS	Nivel de agua	-
Accesorios	**Objetivo**	**Nivel**
Datalogger CR850	Programa y almacenamiento	0 m Caja *Pelican* 1450
Panel solar de 10W	Energización	0 m
Batería de 12V 26 AH	Energización	0 m Caja *Pelican* 1450
Regulador de voltaje	Energización	0 m Caja *Pelican* 1450
Estructura de acero galvanizado	Canalización del sensor	-
t.m.f.p 1"	Canalización de cables	0 m

El día 08 de octubre del 2014 se realizó la primera visita de mantenimiento a la estación de nivel de agua, cuando no se pudo acceder al interior de la caja protectora del *dalogger* CR850, ya que estaba cerrada con un candado del que no se tenía llaves. Sin embargo, se realizó una inspección visual de la estructura y el sistema de energía, los cuales se encontraban en óptimas condiciones.

El día 26 de abril del 2015 se realizó una nueva visita a la estación, cuando si se pudo acceder al interior de la caja protectora del dalogger CR850 (Figura 8.12), procediéndose a la descarga de los datos verificándose al mismo tiempo, que el sensor de nivel arrojaba datos erróneos desde un mes anterior a la visita, por lo que se concluyó que el sensor se encontraba dañado internamente. Adicional a esto se realizaron las inspecciones generales del sistema, encontrándose todo lo demás en buen estado.



Figura 8.12 Equipos de captura y energización de la estación de nivel de agua del lago O'Higgins

El día 6 de octubre del 2015 se dirigió un grupo de profesionales del CECs para reinstalar el sensor de presión de nivel de agua, cuando se observó que dicho sensor y estructura instalados anteriormente al proyecto habían sido arrancados del lugar probablemente por el desprendimiento de témpanos, por lo tanto, se procedió a instalar una nueva estructura de acuerdo a las especificaciones entregadas por Unidad de Glaciología y Nieves de la DGA (Figura 8.9) en la misma ubicación. Para esto la estructura fue aferrada a la roca con pernos de anclaje y un puente de adherencia epóxico, quedando de manera vertical con la sección inferior bajo el agua (Figura 8.13). Dentro de la estructura se montó el sensor de presión (OTT Hydromet Pressure Probe

PLS) y el cable del mismo se canalizó hasta el *datalogger* a través de una tubería metálica flexible existente en el lugar. Luego se realizaron las conexiones respectivas y se verificó el correcto funcionamiento del sensor. Adicionalmente se revisó el sistema de energía que se encontraba en buen estado.



Figura 8.13 Instalación del sensor de nivel de agua por presión en el lago O'Higgins.

El día 1 de julio del 2016 se realizó nuevamente una visita a la estación, cuando fueron descargados los datos del sensor de nivel satisfactoriamente, sin embargo, se observó que el sensor se encontraba arrojando errores desde el 01-01-2016, corroborando al mismo tiempo que la estructura había sido nuevamente desprendida del lugar probablemente por el impacto de algún témpano al encontrarse muy cercano al frente del Glaciar O'Higgins.

8.4 Instalaciónes y mantenimientos de los sistemas de monitoreo fotográfico

8.4.1 Glaciar Jorge Montt

Con el objetivo de monitorear el flujo de hielo en el Glaciar Jorge Montt, fue instalado un sistema de cámara fija en las coordenadas 48°20’23,99’’ S, 73°30’28,57’’ O a 438 msnm (Figura 8.1). Para esto, se construyó un poste de 0.8 metros de alto (color rojo) y un porta caja con posibilidad de desplazamiento en sentido vertical y horizontal para obtener el ángulo de visión requerido por la cámara. Adicionalmente, fue entregado por parte de la DGA al CECs un sistema de captura fotográfica (DigiSnap) y una cámara Canon, los cuales se detallan en la Tabla 8.7.

Tabla 8.7 Componentes del sistema de cámara fija del Glaciar Jorge Montt

Equipo	Modelo
Cámara digital	Canon EOS Rebel T3
Temporizador	DigiSnap 2700
Baterías (2)	Litio 11.1 V 9000mAh
Gabinete	Caja fibra de vidrio
Panel Solar	Policristalino 5W 21.7 V

El día 1 de mayo del 2014, se procedió de acuerdo a lo planificado con la instalación de este sistema, seleccionando un lugar con buena roca y vista directa al Glaciar Jorge Montt. En primer lugar, se fijó la estructura a la roca con pernos de anclaje y un puente de adherencia epóxico, luego se instalaron dos vientos con cables de acero para evitar vibraciones producto de los fuertes vientos en el lugar. Se montó la caja protectora del sistema en la estructura y se niveló de acuerdo con el

ángulo de visión requerida y verificando los puntos topográficos reconocibles (Figura 8.14), además, gracias a la disponibilidad de puntos en roca en el campo visual de la cámara, se instaló una marca fiducial (placa blanca con cruz en color negro) con el fin de prestar apoyo en la corrección del movimiento de la cámara por vibraciones. Una vez realizado esto, se procedió a configurar el sistema de captura, donde se programó la cantidad de siete fotos diarias a partir de las 08:00 am con un intervalo de dos horas entre cada fotografía, las cuales fueron configuradas según hora local de invierno UTC -4.

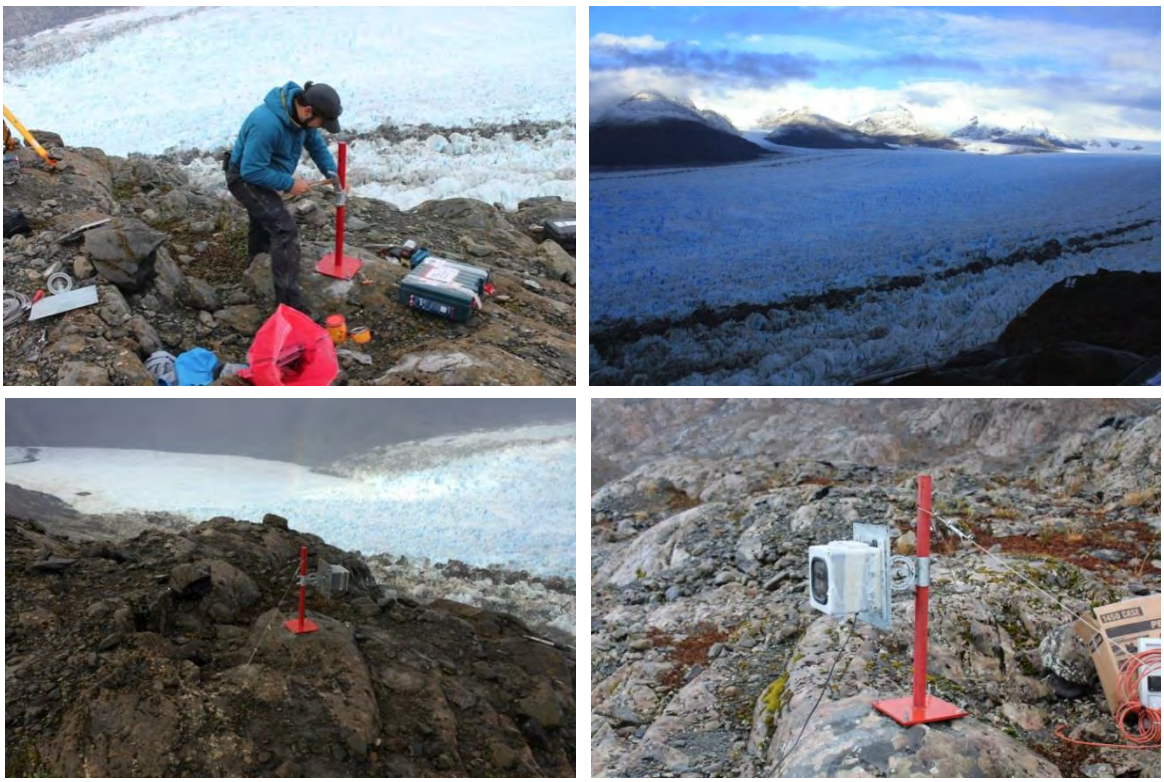


Figura 8.14 Instalación del sistema de cámara fija del Glaciar Jorge Montt

Adicionalmente se tomaron dos puntos de apoyo para la red fotogramétrica con coordenadas 48°20’24.32’’ S, 73°30’28.61’’ O a 424 msnm y 48°20’23.93’’ S, 73°30’28.37’’ O a 426 msnm, desde donde se

capturaron fotografías de apoyo para la red fotogramétrica (Figura 8.15). Al igual que el punto de cámara fija y marcas fiduciales, estos fueron medidos con GPS diferencial (DGPS).

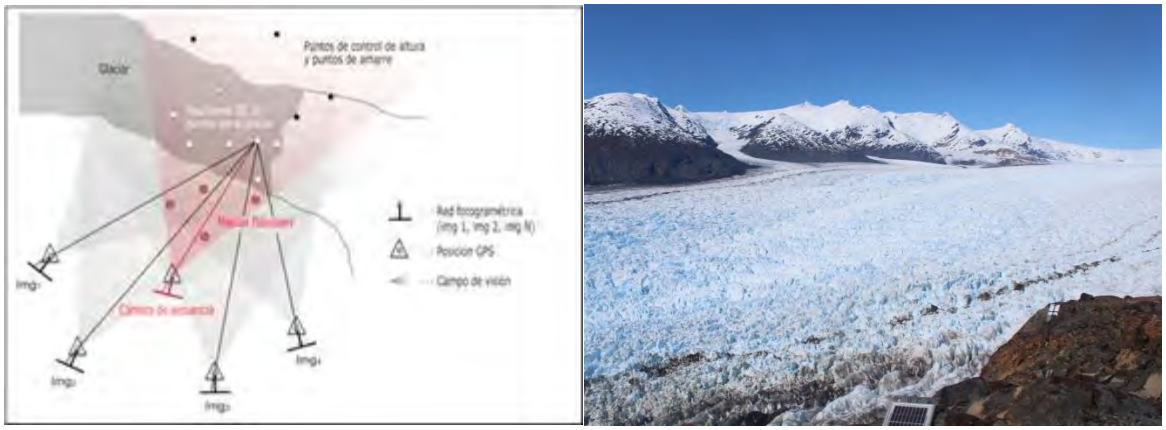


Figura 8.15 Esquema de red fotogramétrica e imagen capturada por cámara fija

El día 25 de septiembre del 2014 se descargaron 503 fotografías en formato JPG a través de la memoria SD HC de la cámara, que comprende el periodo 01-05-2014 al 24-09-2014. Se observó una falla en el sistema de captura, el cual fue reparado y reconfigurado. Adicionalmente se realizó una inspección visual de la estructura y caja contenedora del sistema, encontrándose en perfecto estado.

El día 10 de abril del 2015 se descargaron 79 fotografías, que comprende el periodo 25-09-2014 al 09-04-2015. Se detectó un problema en el sistema de captura que había perdido su configuración automática. Además, se encontró un problema en las fechas de las fotografías (por defecto 01/01/2000), concluyendo con esto, que la pila interna de la cámara se había descargado completamente. La estructura y el sistema de energía de la cámara se encontraban en buen estado.

El día 15 de septiembre del 2015 se descargaron 519 fotografías del periodo 10-04-2015 al 14-09-2015. Adicionalmente y con el fin de solucionar el problema de fechas en las fotografías, se procedió a realizar el recambio de cámaras (Canon Rebel T3 a Canon Rebel T5) y el sistema de captura, configurándose el ángulo de visión y programando la cantidad de fotografías, para una captura diaria con hora UTC-3.

El día 27 de junio del 2016 se descargaron 170 fotografías del periodo 15-09-2015 al 26-06-2016. La cantidad de fotos obtenidas corresponde sólo a un mes, a causa de problemas internos del sistema. Finalmente se retiraron todos los equipos y estructuras los cuales fueron trasladados a Valdivia para su posterior entrega a DGA.

8.4.2 Glaciar Témpano

Con el objetivo de monitorear el flujo de hielo en el Glaciar Témpano, fue instalado un sistema de cámara fija en las coordenadas 48°44′42.4″ S, 73°57′53.8″ O a 452 msnm (Figura 8.4). Para esto, se construyó un poste de 0.8 metros de alto (color rojo) y un porta caja con posibilidad de ajuste en sentido vertical y horizontal para obtener el ángulo de visión requerido desde la cámara. Adicionalmente, fue entregado por parte de la DGA al CECs el sistema de captura fotográfica (DigiSnap) y una cámara Canon, los cuales se detallan en la Tabla 8.8.

Tabla 8.8 Componentes del sistema de cámara fija del Glaciar Témpano

Equipo	Modelo
Cámara digital	Canon EOS Rebel T3
Temporizador	DigiSnap 2700
Baterías (2)	Litio 11.1 V 9000mAh
Gabinete	Caja fibra de vidrio
Panel Solar	Policristalino 5W 21.7 V

El día 7 de mayo del 2014, se procedió de acuerdo a lo planificado con la instalación de este sistema, seleccionando un lugar con buena roca y vista directa al Glaciar Témpano. En primer lugar, se fijó la estructura a la roca con pernos de anclaje y un puente de adherencia epóxico, luego se instalaron dos vientos con cables de acero para evitar vibraciones producto de los fuertes vientos en el lugar. Se montó la caja protectora del sistema en la estructura y se niveló de acuerdo con el ángulo de visión requerida y verificando los puntos topográficos reconocibles (Figura 8.16), además, gracias a la disponibilidad de puntos en roca en el campo visual de la cámara, se instaló una marca fiducial (placa blanca con cruz en color negro), con el fin de prestar apoyo en la corrección del movimiento de la cámara por vibraciones. Una vez realizado esto, se procedió a configurar el sistema de captura programándose la captura de siete fotos diarias a partir de las 08:00 am con un intervalo de dos horas entre cada fotografía, las cuales fueron configuradas según hora local de invierno UTC -4.



Figura 8.16 Instalación del sistema de cámara fija del Glaciar Témpano

Adicionalmente se tomaron dos puntos de apoyo para la red fotogramétrica con coordenadas 48°44’41.50” S, 73°57’51.35’’ O a 433 msnm y 48°44’41.88’’ S, 73°57’54.04’’ O a 448 msnm, desde donde se capturaron fotografías de apoyo para la red fotogramétrica (Figura 8.17). Al igual que el punto de cámara fija y marcas fiduciales, estos fueron medidos con GPS diferencial (DGPS).



Figura 8.17 Esquema de red fotogramétrica e imagen capturada por cámara fija

El día 19 de octubre del 2014 se descargaron 567 fotografías en formato JPG desde la memoria SD HC de la cámara, las que corresponden al periodo 07-05-2014 al 18-10-2014. Se observó una falla en el sistema de captura, el cual fue reparado y reconfigurado. Adicionalmente se realizó una inspección visual de la estructura y caja contenedora del sistema, encontrándose en perfecto estado.

El día 27 de abril del 2015 se descargaron 282 fotografías del periodo 19-10-2014 al 26-04-2015. Se observó un retraso en la hora del sistema de captura, por lo que fue configurado a hora local (UTC-3). Además, se encontró un problema en las fechas de las fotografías (por defecto 01/01/2000), concluyéndose que la pila interna de la cámara se había descargado totalmente. La estructura y el sistema de energía se encontraban en buen estado.

El día 17 de septiembre del 2015 se descargaron 255 fotografías que corresponden al periodo 27-04-2015 al 16-09-2015. Se observó un problema en el sistema de captura que no era capaz de mantener la configuración, por lo que se procedió a realizar el recambio de cámaras (Canon Rebel T3 a Canon Rebel T5).

El día 2 de julio del 2016 se descargaron 393 fotografías del periodo 17-09-2015 al 01-07-2016, cuando se observaron capturas repetitivas en un mismo día a causa de la pérdida automática de la configuración del sistema de captura. Finalmente se retiraron todos los equipos y estructuras los cuales fueron trasladados a Valdivia para su posterior entrega a DGA.

8.4.3 Glaciar O'Higgins

Con el objetivo de monitorear el flujo de hielo en el Glaciar O'Higgins, fue instalado un sistema de cámara fija en las coordenadas 48°55'39.4'' S, 73°70.8'51.1'' O a 390 msnm (Figura 8.7). Para esto se construyó un poste de 0.8 metros de alto (color rojo) y un porta caja con ajuste en sentido vertical y horizontal para obtener el ángulo de visión requerido de la cámara. Adicional a esto, fue entregado por parte de la DGA al CECs el sistema de captura fotográfica (*DigiSnap*) y una cámara Canon, los cuales se detallan en la Tabla 8.9.

Tabla 8.9 Componentes del sistema de cámara fija del Glaciar O'Higgins

Equipo	Modelo
Cámara digital	Canon EOS Rebel T3
Temporizador	DigiSnap 2700
Baterías (2)	Litio 11.1 V 9000mAh
Gabinete	Caja fibra de vidrio
Panel Solar	Policristalino 5W 21.7 V

El día 6 de mayo del 2014, se procedió de acuerdo a lo planificado con la instalación de este sistema, seleccionando un lugar con buena roca y vista directa al Glaciar O'Higgins. En primer lugar, se fijó la estructura a

la roca con pernos de anclaje y un puente de adherencia epóxico, luego se instalaron dos vientos con cables de acero para evitar vibraciones producto de los fuertes vientos en el lugar. Se montó la caja protectora del sistema en la estructura y se niveló de acuerdo con el ángulo de visión requerida y verificando los puntos topográficos reconocibles (Figura 8.18), además, gracias a la disponibilidad de puntos en roca en el campo visual de la cámara, se instaló una marca fiducial (placa blanca con cruz en color negro), con el fin de prestar apoyo en la corrección del movimiento de la cámara por vibraciones. Una vez realizado esto, se procedió a configurar el sistema de captura para lo que se programó la cptura de siete fotos diarias a partir de las 08:00 am con un intervalo de dos horas entre cada fotografía, las cuales fueron configuradas según hora local de invierno UTC -4.

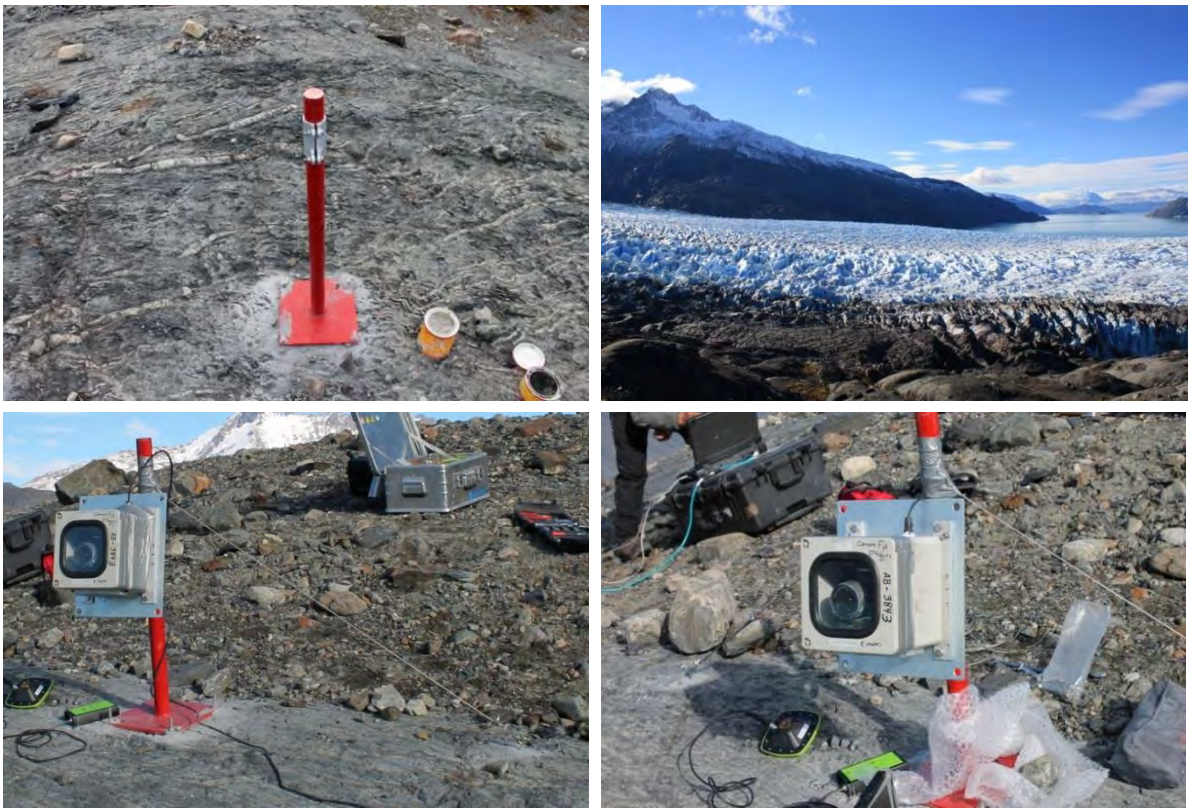


Figura 8.18 Instalación del sistema de cámara fija del Glaciar O'Higgins

Adicionalmente se tomaron dos puntos de apoyo para la red fotogramétrica con coordenadas 48°55'37,77" S, 73°08'54,35'' O a 393 msnm y 48°55'39.46'' S, 73°08'50.76'' O a 394 msnm, desde donde se capturaron fotografías de apoyo para la red fotogramétrica (Figura 8.19). Al igual que el punto de cámara fija y marcas fiduciales, estos fueron medidos con GPS diferencial (DGPS).



Figura 8.19 Esquema de red fotogramétrica e imagen capturada por cámara fija.

El día 8 de octubre del 2014 se descargaron 148 fotografías en formato JPG desde la memoria SD HC de la cámara, las que corresponden al periodo 06-05-2014 al 07-10-2014. Se observó un problema en el sistema de captura al perder su configuración, el cual fue nuevamente reconfigurado. Adicional a esto, se realizó una inspección visual de la estructura y caja contenedora del sistema, encontrándose en perfecto estado.

El día 26 de abril del 2015 se descargaron 148 fotografías en formato JPG, que comprende el periodo 08-10-2014 al 25-04-2015. Se observó un problema en el sistema de captura al perder su configuración, el cual fue nuevamente reconfigurado. Además, se encontró un problema en las fechas de las fotografías (por defecto 01/01/2000), concluyendo con esto la descarga total de la pila interna de la cámara. En cuanto a la estructura y el sistema de energía se encontraban en buen estado.

El día 28 de septiembre del 2015 personal del CECs se dirigió nuevamente a este punto para realizar el rescate de las fotografías y el mantenimiento en general del sistema, cuando se detectó una falla en el sistema de captura que no registró fotografías desde la última

configuración. Se reprogramar el sistema (DigiSnap) para capturar siete fotos diarias, pero pro problemas de hardware no se tuvo éxito, por lo cual se integró un nuevo sistema de captura, en este caso desarrollado por el CECs (Figura 8.20). Este quedó configurado con los mismos intervalos de captura y hora local UTC-3. Adicionalmente, y con el fin de solucionar el problema de fechas en las fotografías se procedió a realizar el recambio de cámaras (Canon Rebel T3 a Canon Rebel T5).



Figura 8.20 Instalación de un nuevo sistema de captura (CECs) en la cámara fija del Glaciar O'Higgins

El día 1 de julio del 2016 se descargaron 1619 fotografías logrando el 100% de capturas, que comprende el periodo 28-09-2015 al 30-06-2016, lo cual confirma que el sistema DigiSnap no es apto para las condiciones presentes en ese lugar. Finalmente se retiraron todos los equipos y estructuras los cuales fueron trasladados a Valdivia para su posterior entrega a DGA.

8.5 Instalaciónes y mantenimientos de las estaciones meteorológicas en Meseta

8.5.1 Hielo sur en Glaciar Greve

La estación meteorológica Hielo sur en Glaciar Greve se encuentra ubicada actualmente en las coordenadas 48°49′55′′ S, 73°34′53′′ O, a 1428 msnm (Figura 8.21). Esta fue instalada en este proyecto por el Centro de Estudios Científicos (CECs) y pertenece a la red de estaciones meteorológicas de la Dirección General de Aguas (DGA).

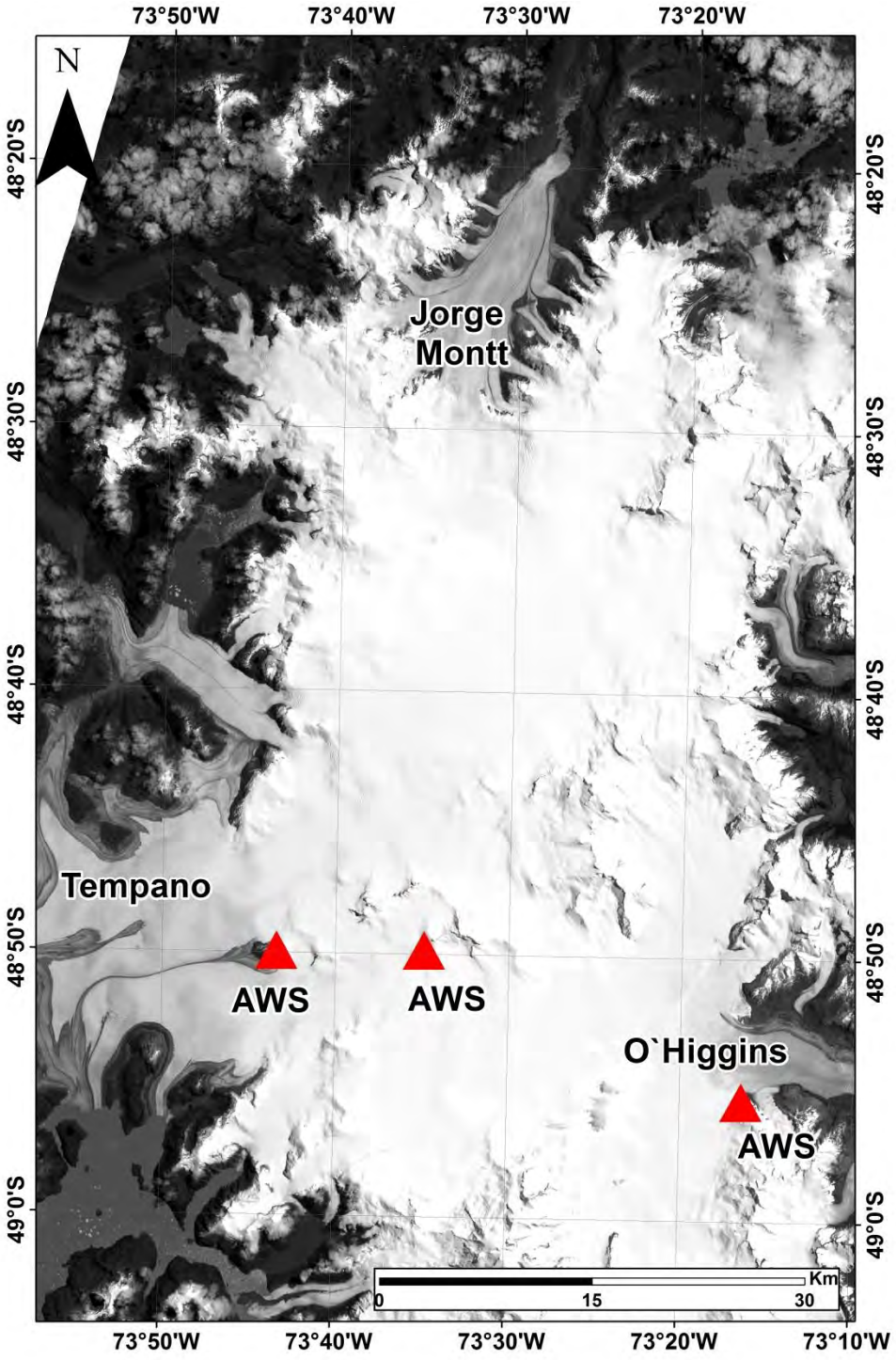


Figura 8.21 Localización de las estaciones meteorológicas AWS en Glaciar Greve (triángulo central), en Glaciar Greve Nunatak Occidental (triángulo izquierdo) y AWS en Glaciar O'Higgins (triángulo derecho)

La estación meteorológica está compuesta de una estructura de acero galvanizado de 4 metros de alto, con travesaños para el montaje de sensores a 2 y 4 metros respectivamente, soportes adicionales para el montaje de cuatro paneles solares, una antena y dos cajas de fibra de vidrio (Figura 8.22). Adicionalmente se construyó una estructura en forma de "L" para el montaje del sensor de altura de nieve.



Figura 8.22 Estación meteorológica Hielo sur en Glaciar Greve

El sistema de monitoreo meteorológico se compone básicamente de dos estaciones meteorológicas independientes montadas en la misma estructura, una estación principal con transmisión de datos vía satélite y una estación de respaldo. En la Tabla 8.10 se describen los componentes del sistema principal y en la Tabla 8.11 los componentes del sistema de respaldo.

Tabla 8.10 Componentes de la estación meteorológica principal, Hielo sur en Glaciar Greve

Sensor	Estación	Nivel	Variable	Estructura
Thies clima Temperature compact	Transmisión	2 m	Temperatura del aire y humedad relativa	Principal
Anemómetro RM *Young* 5103	Transmisión	4 m	Velocidad y dirección del viento	Principal
Young 41382VC	Transmisión	4 m	Temperatura del aire y humedad relativa	Principal
CGR3	Transmisión	4 m	Radiación incidente de onda larga	Principal
CMP3	Transmisión	4 m	Radiación incidente de onda corta	Principal
Vaisala PTB110	Transmisión	1.5 m (Caja *Campbell*)	Presión atmosférica	Principal
Accesorios			**Objetivo**	
Datalogger Vaisala	Transmisión	1.5 m (Caja *Campbell*)	Programa, almacenamiento y transmisión	Principal
Antena transmisión *Yagi*	Transmisión	3.3 m	Transmisión	Principal
Antena GPS	Transmisión	2 m	Ubicación	Principal
Panel solar (2 de 20W)	Transmisión	3 m	Energización	Principal
Baterías (2 de 100 AH)	Transmisión	0 m (Caja *Pelican*)	Energización	-
Reguladores (2)	Transmisión	0 m (Caja *Pelican*)	Energización	-

Tabla 8.11 Componentes de la estación meteorológica de respaldo, Hielo sur en Glaciar Greve

Sensor	Estación	Nivel	Variable	Estructura
Anemómetro RM *Young* 5103	Respaldo	2 m	Velocidad y dirección del viento	Principal
Young 41382VC	Respaldo	4 m	Temperatura del aire y humedad relativa	Principal
Thies clima Temperature compact	Respaldo	2 m	Temperatura del aire y humedad relativa	Principal
SR50A	Respaldo	2 m	Altura de nieve	Anexa
Accesorios			**Objetivo**	
Datalogger CR1000	Respaldo	1.5 m (Caja *Campbell*)	Programa y almacenamiento	Principal
Panel solar (2 de 20W)	Respaldo	3 m	Energización	Principal
Baterías (2 de 100 AH)	Respaldo	0 m (Caja *Pelican*)	Energización	-
Reguladores (2)	Respaldo	0 m (Caja *Pelican*)	Energización	-

Ambas unidades cuentan con suministro energético independiente, compuesto por dos paneles solares de 20W, una unidad reguladora de voltaje y dos baterías de gel de ciclo profundo de 100Ah cada una. Estas últimas almacenadas al interior de cajas impermeables, resistentes a impactos. Todas las conexiones entre los componentes se encuentran protegidas con tubería metálica flexible de 1″ y 2″, para obtener una resistencia mayor frente a formaciones de hielo, precipitación y radiación solar.

Entre los días 1 y 4 de octubre del 2014 se realizó la instalación de la estación meteorológica contigua a la estación glaciológica Greve. Para esto fue necesario levantar la estructura de 4 metros y fijarla a la roca con cuatro pernos de anclaje y un puente de adherencia epóxico, adicional a esto, para evitar vibraciones producto de los fuertes vientos en el lugar, se instalaron tres tensores compuestos por cables de acero y chapas fijadas directamente en la roca.

La estructura tipo "L" fue montada de la misma forma que la estación meteorológica, con 4 pernos de anclaje y dos tensores con cables de acero, quedando a 2 metros de altura y a un costado de la torre principal, y de esta forma, evitar interferencias en las mediciones del sensor de altura de nieve SR50A.

El montaje de todos los sensores se realizó de acuerdo a las especificaciones técnicas entregadas por la Unidad de Glaciología y Nieves de la DGA. La canalización del cableado, tanto de los sensores como del sistema de energía se realizó por el interior de las estructuras y a través de tuberías metálicas flexibles de 1" y 2", evitando de esta forma el daño por las condiciones meteorológicas externas. Todos los sensores fueron conectados a sus respectivas unidades colectoras de datos (*datalogger Vaisala* y *datalogger* CR1000) según diagrama de conexiones entregado por el inspector fiscal de la DGA. Adicionalmente se conectó el sistema de transmisión, compuesto por el *datalogger Vaisala* (transmisor interno), una antena GPS y una antena *Yagi*. Ésta última se orientó según los cálculos basados en la coordenada de ubicación, altitud y la declinación magnética, con un ángulo de elevación de 33.9° y un azimut de 342°. El sistema se dejó operativo, verificándose unos días después a través del inspector fiscal la recepción efectiva de los datos vía transmisión satelital GOES. Con esto, se dio cumplimiento a la instalación y puesta en operación de la primera estación meteorológica en la zona alta de Campo de Hielo Sur (Figura 8.23).



Figura 8.23 Trabajos de instalación de la estación meteorológica Hielo sur en Glaciar Greve

En abril del 2015 se realizó la primera visita a la estación para realizar la descarga de datos y el mantenimiento de los sensores y equipamiento en general. En primer lugar, se realizó una inspección visual de las condiciones de las estructuras y cajas contenedoras de equipos, luego se procedió con la descarga de los datos de la estación principal (*datalogger Vaisala*) y posteriormente la estación de respaldo (d*atalogger* CR1000). Esta se encontraba con algunos de sus sensores dañados, tanto en la sección a 4 metros como también los instalados a 2 metros. Junto con esto, la antena de transmisión, tuberías metálicas flexibles desacopladas de sus terminales y dos de tres tensores estaban dañados (cortados), por lo que se procedió a instalar nuevos tensores y

acoplar las canalizaciones y de esta forma evitar daños en la estructura y en los equipos por las vibraciones y los fuertes vientos presentes en el lugar. En cuanto al recambió de sensores se dejó programada para la posterior campaña, ya que las condiciones de logística y meteorológicas impedían continuar con personal en ese lugar.

El día 28 de septiembre del 2015 se realizó la segunda visita a la estación, cuando se encontró la estructura cubierta en parte por una capa de hielo y nieve (cencellada), la cual tuvo que ser removida inmediatamente para lograr obtener acceso al interior de las cajas protectoras, y de esta forma, descargar la totalidad de los datos correspondientes a los meses abril del 2015 a septiembre del 2015 en ambas estaciones. Para subsanar los daños observados en la anterior campaña, se procedió a instalar nuevos sensores, junto con el cambio de piezas en algunos casos (anemómetro), además de instalar una nueva antena de transmisión y reinstalando tres tensores a la estructura principal.

El día 15 de julio del 2016 se realizó la tercera visita a la estación, cuando fue posible realizar la descarga de ambas estaciones (principal y respaldo), adicional a esto, se realizó una inspección visual del estado de los sensores y estructuras, encontrándose que la estructura estab un poco inclinada a causa de la rotura de dos de cuatro pernos de anclaje que la fijan a la roca. Esto impidió (por seguridad) realizar el recambio de sensores dañados a 2 y 4 metros respectivamente. Sin embargo, se fijaron nuevamente tres tensores con cable de acero para evitar el desprendimiento de la estructura en el corto plazo. En cuanto al sistema de energía y las unidades colectoras de datos, se encontraban en óptimas condiciones de funcionamiento.

8.5.2 Hielo sur en Glaciar Greve Nunatak Occidental

La estación meteorológica Hielo sur en Glaciar Greve Nunatak Occidental se encuentra ubicada en las coordenadas 48°49′59′′ S, 73°43′25′′ O, a 1040 msnm (Figura 8.21). Esta fue instalada en este proyecto por el Centro de Estudios Científicos (CECs) y pertenece a la red de estaciones meteorológicas de la Dirección General de Aguas (DGA).

Esta estación meteorológica está compuesta por una estructura de acero galvanizado de 4 metros de alto, con travesaños para el montaje de sensores a 2 y 4 metros respectivamente (Anexo G), soportes adicionales para el montaje de cuatro paneles solares, una antena y dos cajas de fibra de vidrio (Figura 8.24). Adicionalmente se construyó una estructura en forma de "L" para el montaje del sensor de altura de nieve SR50A y un sensor de radiación CNR4.



Figura 8.24 Estación meteorológica Hielo sur en Glaciar Greve Nunatak Occidental

El sistema de monitoreo meteorológico se compone básicamente de dos estaciones meteorológicas independientes montadas en la misma estructura, una estación principal con transmisión de datos vía satélite y

una estación de respaldo. En la Tabla 8.12 se describen los componentes del sistema principal y en la Tabla 8.13 los componentes del sistema de respaldo.

Tabla 8.12 Componentes de la estación meteorológica principal, Hielo sur en Glaciar Greve Nunatak Occidental

Sensor	Estación	Nivel	Variable	Estructura
Temperatura y Humedad pasiva	Transmisión	4 m	Temperatura del aire y humedad relativa	Principal
Anemómetro *Young*5103-V	Transmisión	4 m	Velocidad y dirección del viento	Principal
Temperatura y Humedad Aspirada	Transmisión	2 m	Temperatura del aire y humedad relativa	Principal
CGR3	Transmisión	4 m	Radiación incidente de onda larga	Principal
CMP3	Transmisión	4 m	Radiación incidente de onda corta	Principal
SR50A	Transmisión	2 m	Altura de nieve	Anexa
Setra 278	Transmisión	1.5 m (Caja *Campbell*)	Presión atmosférica	Principal
Accesorios			**Objetivo**	
Datalogger CR1000	Transmisión	1.5 m (Caja *Campbell*)	Programa y almacenamiento	Principal
Antena transmisión *Yagi*	Transmisión	3.3 m	Transmisión	Principal
Antena GPS	Transmisión	2 m	Ubicación	Principal
Transmisor *Campbell* Tx312	Transmisión	1.5 m (Caja *Campbell*)	Transmisión	Principal
Panel solar (2 de 20W)	Transmisión	3 m	Energización	Principal
Baterías (2 de 100 AH)	Transmisión	0 m (Caja *Pelican*)	Energización	-
Reguladores (2)	Transmisión	0 m (Caja *Pelican*)	Energización	-

Tabla 8.13 Componentes de la estación meteorológica de respaldo, Hielo sur en Glaciar Greve Nunatak Occidental

Sensor	Estación	Nivel	Variable	Estructura
Anemómetro *Young* 5103-V	Respaldo	2 m	Velocidad y dirección del viento	Principal
Temperatura y Humedad aspirada	Respaldo	4 m	Temperatura del aire y humedad relativa	Principal
Temperatura y Humedad pasiva	Respaldo	2 m	Temperatura del aire y humedad relativa	Principal
CNR4	Respaldo	2 m	Radiación neta y por componente	Anexa
Accesorios			**Objetivo**	
Datalogger CR1000	Respaldo	1.5 m (Caja *Campbell*)	Programa y almacenamiento	Principal
Panel solar (2 de 20W)	Respaldo	3 m	Energización	Principal
Baterías (2 de 100 AH)	Respaldo	0 m (Caja *Pelican*)	Energización	-
Reguladores (2)	Respaldo	0 m (Caja *Pelican*)	Energización	-

Ambas unidades cuentan con suministro energético independiente, compuesto por dos paneles solares de 20W, una unidad reguladora de voltaje y dos baterías de gel de ciclo profundo de 100Ah cada una. Estas últimas almacenadas al interior de cajas impermeables, resistentes a impactos. Todas las conexiones entre los componentes se encuentran protegidas con tubería metálica flexible de 1" y 2", para obtener una resistencia mayor frente a formaciones de hielo, precipitación y radiación solar.

Entre los días 19 de abril y 4 de mayo del 2015 se realizó la instalación provisoria de la estación de respaldo, fijando una estructura a roca con cuatro pernos de anclaje y un puente de adherencia epóxico y tres tensores compuestos por cables de acero y chapas. Todos los sensores

correspondientes a esta estación fueron correctamente conectados y verificados a los días siguientes al descargar los datos del *datalogger*.

Entre los días 22 y 25 de septiembre del 2015 se realizó la descarga de los datos de la estación provisoría instalada en la campaña anterior, comprobando el correcto funcionamiento de todos sus sensores, luego de realizado esto, se desmontaron todos los equipos y la estructura fue removida para dejar lugar a la torre definitiva. La instalación de la estación meteorológica definitiva quedó contigua a la estación glaciológica Témpano. Para esto, fue necesario levantar la estructura de 4 metros por medio de un sistema de bisagras y fijarla a la roca con cuatro pernos de anclaje y un puente de adherencia epóxico, adicionalmente, y para evitar vibraciones producto de los fuertes vientos en el lugar, se instalaron tres tensores compuestos por cables de acero y chapas fijadas directamente en la roca.

La estructura tipo "L" fue montada de la misma forma que la estación meteorológica, con 4 pernos de anclaje y dos tensores con cables de acero, quedando a 2 metros de altura y a un costado de la torre principal, y de esta forma, evitar interferencias en las mediciones del sensor de altura de nieve SR50A y el sensor de radiación CNR4.

El montaje de todos los sensores se realizó de acuerdo a las especificaciones técnicas entregadas por la Unidad de Glaciología y Nieves de la DGA. La canalización del cableado, tanto de los sensores como del sistema de energía se realizó por el interior de las estructuras y a través de tuberías metálicas flexibles de 1" y 2", evitando de esta forma el daño por las condiciones meteorológicas externas. Todos los sensores fueron conectados a sus respectivas unidades colectoras de datos (*datalogger* CR1000) según diagrama de conexiones entregado por el inspector fiscal de la DGA. Adicionalmente se conectó el sistema

de transmisión, compuesto por un transmisor TX312, un GPS y una antena *Yagi*. Ésta última, se orientó según los cálculos basados en la coordenada de ubicación, altitud y la declinación magnética, con un ángulo de elevación de 33.9° y un azimut de 342°. El sistema se dejó operativo, verificándose unos días después por el inspector fiscal la recepción efectiva de los datos vía transmisión satelital GOES. Con esto, se dio cumplimiento a la instalación y puesta en operación de la segunda estación meteorológica en la zona alta de Campo de Hielo Sur (Figura 8.25).



Figura 8.25 Trabajos de instalación de la estación meteorológica Hielo sur en Glaciar Greve Nunatak Occidental

El día 2 de julio del 2016 se realizó la primera visita a la estación para realizar la descarga de datos y el mantenimiento de los sensores y equipamiento en general. En primer lugar, se realizó una inspección visual de las condiciones de las estructuras y cajas contenedoras de equipos, luego se procedió con la descarga de los datos de la estación principal y posteriormente con la estación de respaldo, ambos con un *datalogger* CR1000 encontrándose con los sensores operando dentro de los rangos normales de funcionamiento, a excepción del anemómetro de la estación de respaldo a 2 metros que fue reemplazado por un sensor nuevo. El sistema de energía se encontraba con valores de voltaje correctos y ambas estructuras se encontraban en perfectas condiciones. Adicionalmente, y en virtud de lo solicitado por el inspector fiscal de la DGA, se reconfiguró el transmisor TX312 de la estación principal con los nuevos parámetros de transmisión detallados en la Tabla 8.14.

Tabla 8.14 Parámetros de transmisión, estación principal HS en Glaciar Greve Nunatak Occidental

Parámetros Antiguos						
Canal	**BNA**	**ID**	**Estación**	**GMT**	**Seg**	**Plataforma**
13	12020001-1	56AA2014	Hielo Sur en Glaciar Greve Nunatak Occidental	0:15:40	940	CR1000
Parámetros Nuevos						
Canal	**BNA**	**ID**	**Estación**	**GMT**	**Seg**	**Plataforma**
47	12020001-1	56B01D90	Hielo Sur en Glaciar Greve Nunatak Occidental	0:18:00	-	CR1000

8.5.3 Hielo sur en Glaciar O'Higgins

La estación meteorológica Hielo sur en Glaciar O'Higgins se encuentra ubicada actualmente en las coordenadas 48°55'28'' S, 73°16'26'' O, a 1234 msnm (Figura 8.21). Esta fue instalada en este proyecto por el Centro de Estudios Científicos (CECs) y pertenece a la red de estaciones meteorológicas de la Dirección General de Aguas (DGA).

La estación meteorológica está compuesta de una estructura de acero galvanizado de 4 metros de alto, con travesaños para el montaje de sensores a 2 y 4 metros respectivamente (Anexo G), soportes adicionales para el montaje de cuatro paneles solares, una antena y dos cajas de fibra de vidrio (Figura 8.26). Adicionalmente se construyó una estructura en forma de "L" para el montaje del sensor de altura de nieve SR50A.



Figura 8.26 Estación meteorológica Hielo sur en Glaciar O'Higgins

El sistema de monitoreo meteorológico se compone básicamente de dos estaciones meteorológicas independientes montadas en la misma

estructura, una estación principal con transmisión de datos vía satélite y una estación de respaldo. En la Tabla 8.15 se describen los componentes del sistema principal y en la Tabla 8.16 los componentes del sistema de respaldo.

Tabla 8.15 Componentes de la estación meteorológica principal, Hielo sur en Glaciar O'Higgins

Sensor	Estación	Nivel	Variable	Estructura
Temperatura y Humedad	Transmisión	2 m	Temperatura del aire y humedad relativa	Principal
Anemómetro *Young* 5103-V	Transmisión	4 m	Velocidad y dirección del viento	Principal
Temperatura y Humedad	Transmisión	4 m	Temperatura del aire y humedad relativa	Principal
CGR3	Transmisión	4 m	Radiación incidente de onda larga	Principal
CMP3	Transmisión	4 m	Radiación incidente de onda corta	Principal
Vaisala PTB 110	Transmisión	1.5 m (Caja *Campbell*)	Presión atmosférica	Principal
Accesorios			**Objetivo**	
Datalogger Vaisala	Transmisión	1.5 m (Caja *Campbell*)	Programa, almacenamiento y transmisión	Principal
Antena transmisión *Yagi*	Transmisión	3.3 m	Transmisión	Principal
Antena GPS	Transmisión	2 m	Ubicación	Principal
Panel solar (2 de 20W)	Transmisión	3 m	Energización	Principal
Baterías (2 de 100 AH)	Transmisión	0 m (Caja *Pelican*)	Energización	-
Reguladores (2)	Transmisión	0 m (Caja *Pelican*)	Energización	-

Tabla 8.16 Componentes de la estación meteorológica de respaldo, Hielo sur en Glaciar O'Higgins

Sensor	Estación	Nivel	Variable	Estructura
Anemómetro *Young* 5103-V	Respaldo	2 m	Velocidad y dirección del viento	Principal
Temperatura y Humedad aspirada	Respaldo	4 m	Temperatura del aire y humedad relativa	Principal
Temperatura y Humedad pasiva	Respaldo	2 m	Temperatura del aire y humedad relativa	Principal
SR50A	Respaldo	2 m	Altura de nieve	Anexa
Accesorios			**Objetivo**	
Datalogger CR1000	Respaldo	1.5 m (Caja *Campbell*)	Programa y almacenamiento	Principal
Panel solar (2 de 20W)	Respaldo	3 m	Energización	Principal
Baterías (2 de 100 AH)	Respaldo	0 m (Caja *Pelican*)	Energización	-
Reguladores (2)	Respaldo	0 m (Caja *Pelican*)	Energización	-

Ambas unidades cuentan con suministro energético independiente, compuesto por dos paneles solares de 20W, una unidad reguladora de voltaje y dos baterías de gel de ciclo profundo de 100Ah cada una. Estas últimas almacenadas al interior de cajas impermeables resistentes a impactos. Todas las conexiones entre los componentes se encuentran protegidas con tubería metálica flexible de 1" y 2", para obtener una resistencia mayor frente a formaciones de hielo, precipitación y radiación solar.

Entre los días 14 y 23 de octubre del 2015 se realizó la instalación de la estación meteorológica contigua a la estación glaciológica O'Higgins. Para esto fue necesario levantar la estructura de 4 metros por medio de un sistema de bisagras y fijarla a la roca con cuatro pernos de anclaje y un puente de adherencia epóxico, adicionalmente, y para evitar vibraciones producto de los fuertes vientos en el lugar, se instalaron tres

tensores compuestos por cables de acero y chapas fijadas directamente en la roca.

La estructura tipo "L" fue montada de la misma forma que la estación meteorológica, con 4 pernos de anclaje y dos tensores con cables de acero, quedando a 2 metros de altura y a un costado de la torre principal, de esta forma evitando interferencias en las mediciones del sensor de altura de nieve SR50A.

El montaje de todos los sensores se realizó de acuerdo a las especificaciones técnicas entregadas por la Unidad de Glaciología y Nieves de la DGA. La canalización del cableado, tanto de los sensores como del sistema de energía se realizó por el interior de las estructuras y a través de tuberías metálicas flexibles de 1" y 2", evitando de esta forma el daño por las condiciones meteorológicas externas. Todos los sensores fueron conectados a sus respectivas unidades colectoras de datos (*datalogger Vaisala* y *datalogger* CR1000) según diagrama de conexiones entregado por el inspector fiscal de la DGA. Adicionalmente se conectó el sistema de transmisión, compuesto por el *datalogger Vaisala* (transmisor interno), un GPS y una antena *Yagi*. Ésta última se orientó según los cálculos basados en la coordenada de ubicación, altitud y la declinación magnética, con un ángulo de elevación de 33,8° y un azimut de 342°. El sistema se dejó operativo, verificándose unos días después por el inspector fiscal la recepción efectiva de los datos vía transmisión satelital GOES. Con esto, se dio cumplimiento a la instalación y puesta en operación de la tercera estación meteorológica en la zona alta de Campo de Hielo Sur (Figura 8.27).



Figura 8.27 Trabajos de instalación de la estación meteorológica Hielo sur en Glaciar O'Higgins

Entre los días 1 y 12 de julio del 2016 se realizó la primera visita a la estación para realizar la descarga de datos y el mantenimiento de los sensores y equipamiento en general. En primer lugar, se realizó una inspección visual de las condiciones de las estructuras y cajas contenedoras de equipos, luego se procedió con la descarga de los datos de la estación principal (*Datalogger Vaisala*) y posteriormente la estación de respaldo (*Datalogger* CR1000) encontrándose con los sensores operando dentro de los rangos normales de funcionamiento, a excepción de un sensor de temperatura de la estación principal a 4 metros, que fue reemplazado por un sensor nuevo. El sistema de energía se encontraba con valores de voltaje correctos y ambas

estructuras se encontraba en perfectas condiciones. Adicionalmente, y en virtud de lo solicitado por el inspector fiscal de la DGA, se reconfiguró el transmisor en el *datalogger Vaisala* de la estación principal con los nuevos parámetros de transmisión detallados en la Tabla 8.17.

Tabla 8.17 Parámetros de transmisión, estación principal HS en Glaciar O'Higgins

Parámetros Antiguos						
Canal	**BNA**	**ID**	**Estación**	**GMT**	**Seg**	**Plataforma**
13	11706001-2	56AA158E	Hielo sur en Glaciar O'Higgins	0:15:30	930	*Vaisala*
Parámetros Nuevos						
Canal	**BNA**	**ID**	**Estación**	**GMT**	**Seg**	**Plataforma**
47	11706001-2	56B0280A	Hielo sur en Glaciar O'Higgins	0:18:10		*Vaisala*

9 Implementación de Estaciones Glaciológicas en la zona norte de Campo de Hielo Sur

9.1 Resumen

Se presentan los detalles del proceso de construcción, modificación e instalación de módulos que componen las estaciones glaciológicas del proyecto, las que fueron ubicadas en afloramientos rocosos (*nunataks*), ubicados en la meseta del CHS. Se incluye la descripción de los mantenimientos efectuados y se enumeran los problemas detectados y los arreglos realizados.

9.2 Definición de la ubicación de las Estaciones Glaciológicas

Como parte de las actividades planificadas para la primera campaña a terreno del proyecto y con el objetivo de evaluar preliminarmente posibles sitios para la instalación de las Estaciones Glaciológicas en las proximidades de los glaciares Jorge Montt y Témpano, en mayo de 2014 se realizó un vuelo de reconocimiento en la meseta de CHS (*plateau*) buscando los lugares propuestos de instalación (obtenidos en el trabajo previo de laboratorio con imágenes satelitales y modelos digitales de elevación, DEMs), verificando así que dichos sitios fueran utilizables para esta tarea. Estos sitios debían tener sectores rocosos relativamente nivelados, ser de aproximadamente 30 m^2 de superficie y estar alejados de pendientes que pudieran generar avalanchas. Además de las características locales de cada sitio, se consideraron los accesos, en especial campos de grietas y pendientes entre el sitio rocoso y el hielo. En el trabajo previo se seleccionaron tres puntos tentativos (Figura 9.1) para la instalación de la Primera Estación Glaciológica en las proximidades del Glaciar Jorge Montt (JM-1, JM-2 y JM-3), los que se

reevaluarían en la segunda campaña del mismo año (octubre 2014) para estimar la cobertura nival. Adicionalmente, se incluyó un punto tentativo para la implementación de la Segunda Estación Glaciológica del proyecto (TMP-1).

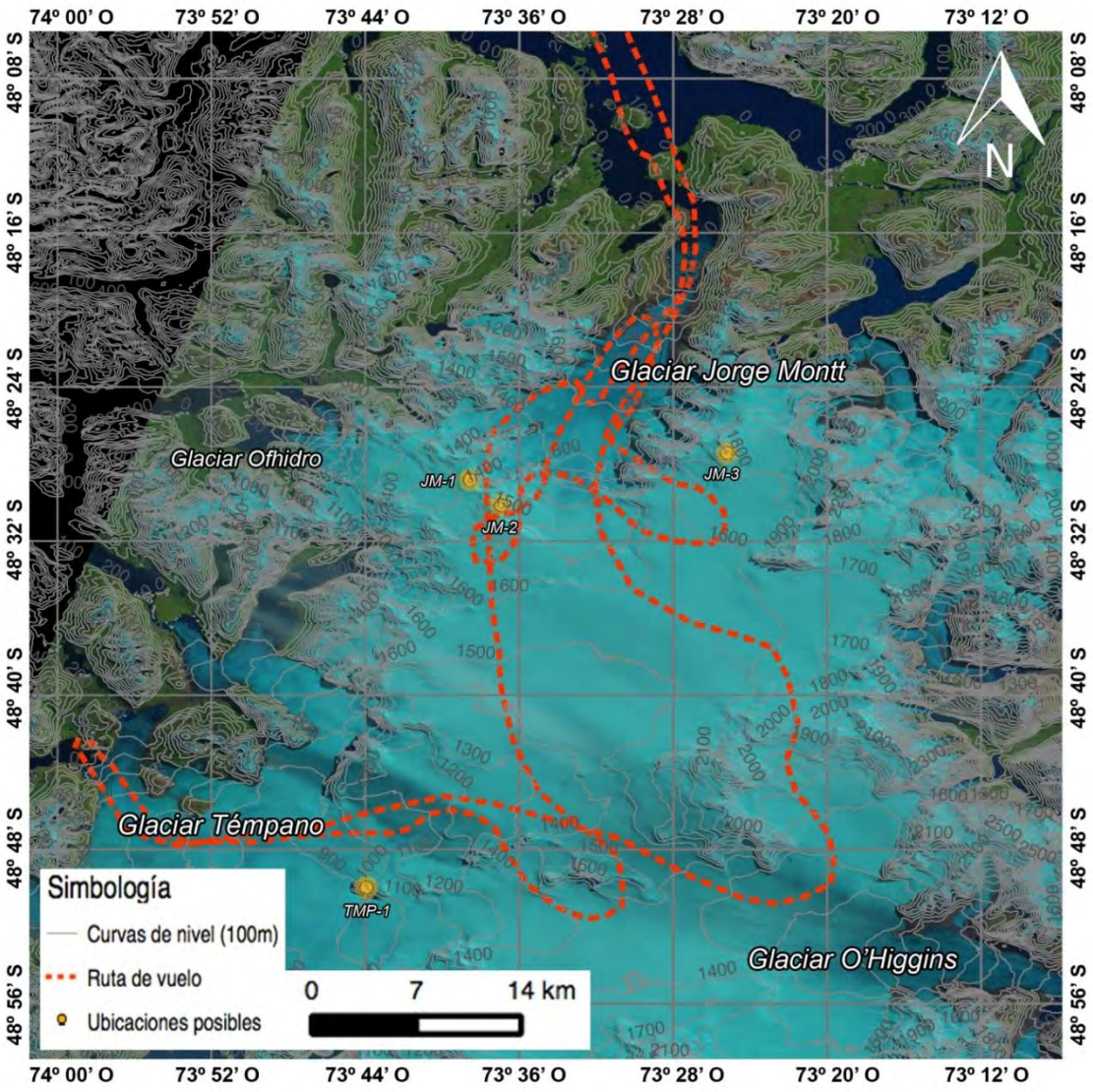


Figura 9.1 Ruta seguida durante el sobrevuelo de reconocimiento de posibles sitios de instalación de las Estaciones Glaciológicas en el sector norte de CHS (06 de mayo de 2014).

Durante la segunda campaña (octubre 2014), se realizaron vuelos de reconocimiento de posibles sitios para la instalación de los módulos, siguiendo un plan previamente elaborado en gabinete que consideró las zonas de grietas, posibles rutas terrestres y afloramientos rocosos factibles a ser empleados. Este sobrevuelo fue realizado por profesionales del laboratorio de Glaciología del CECs y profesionales de la Unidad de Glaciología y Nieves de la Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas. Luego de la evaluación indicada, fueron descartados los puntos preseleccionadas en el Glaciar Jorge Montt, principalmente debido a la presencia de grietas, ser superficies de tamaños menores a los mínimos requeridos y presentar fuertes pendientes en sus alrededores.

Finalmente, entre el CECs y la DGA se seleccionó para la implementación de la primera Estación Glaciológica, un afloramiento rocoso (Figura 9.2) que cumplía con las condiciones requeridas, ubicado en la parte superior del Glaciar Greve (48º49’58.79’’S, 73º34’53.61’’O, 1428 m snm.

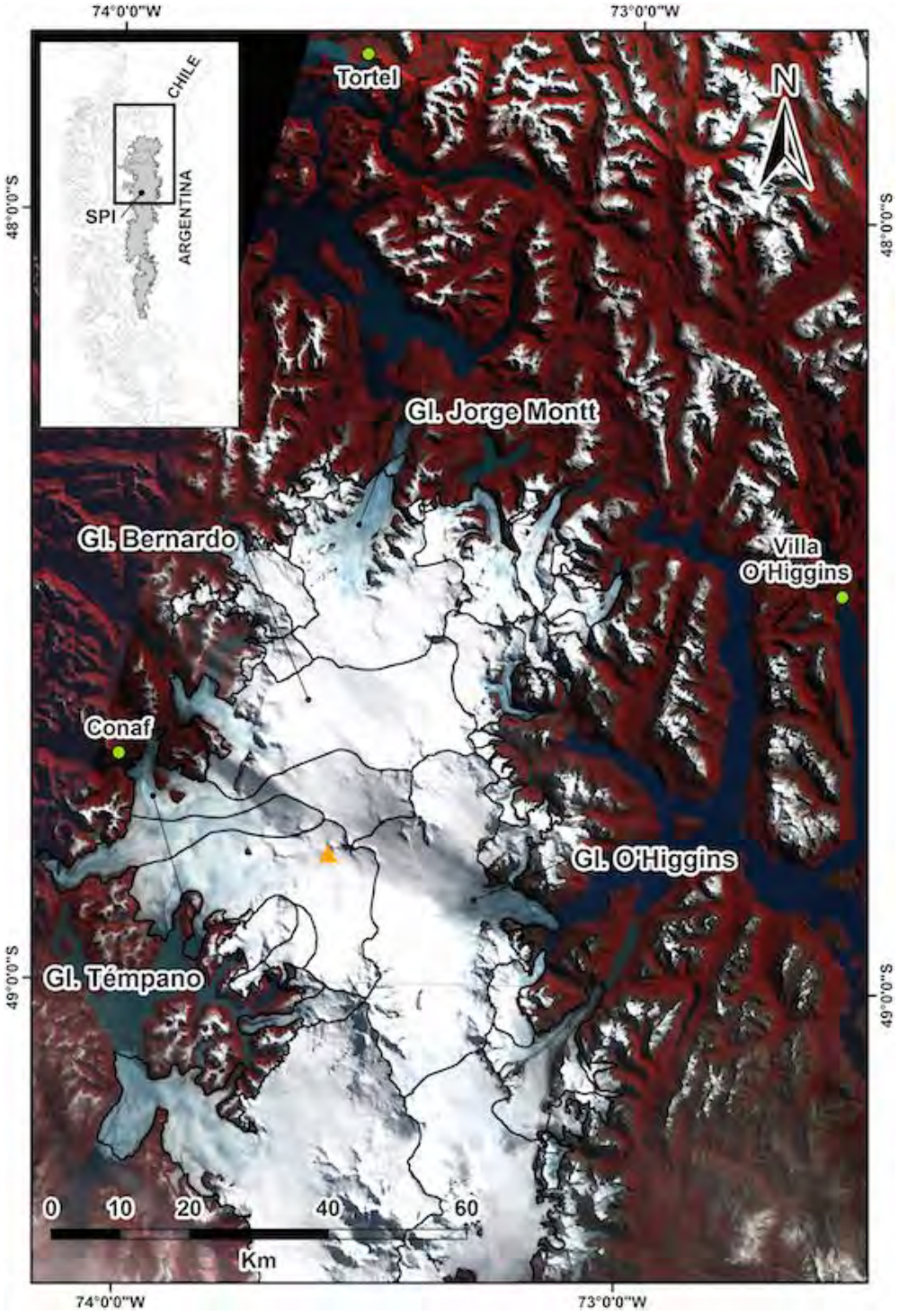


Figura 9.2 *Nunatak* seleccionado para la instalación de la primera Estación Glaciológica "Greve" (triángulo naranjo).

Al finalizar la segunda campaña de terreno se realizaron vuelos de reconocimiento a los posibles sitios de implementación de los módulos en los glaciares O´Higgins y Témpano (Figura 9.3).

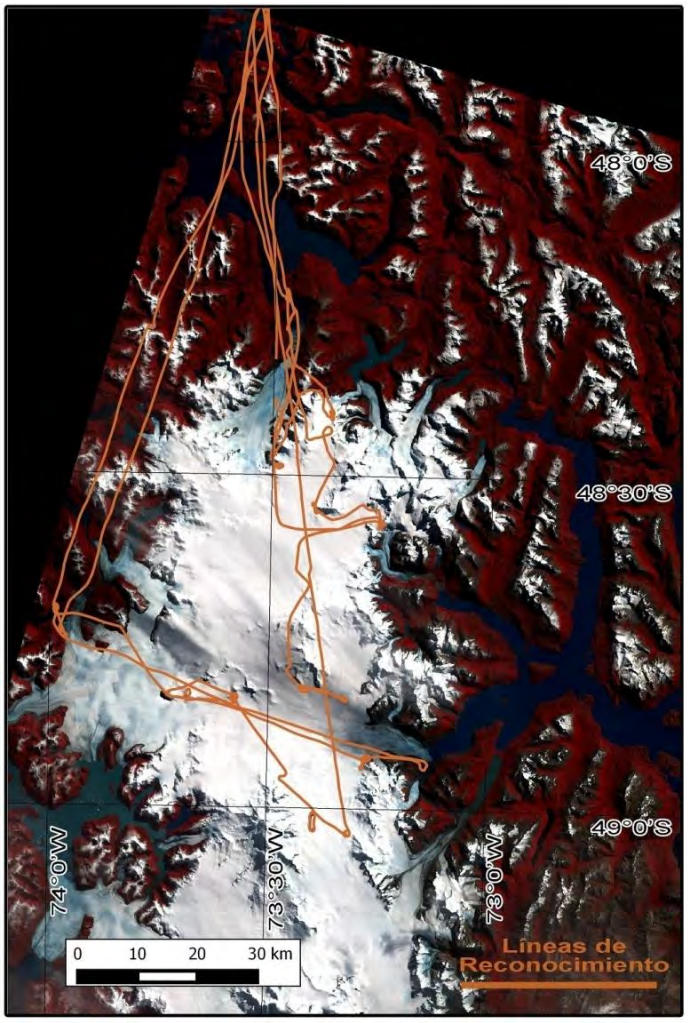


Figura 9.3 Ruta de sobrevuelos de reconocimiento para la selección de sitios de instalación de Estaciones Glaciológicas (octubre 2014).

Cerca de la línea de equilibrio del Glaciar O'Higgins se identificó un afloramiento rocoso (ver cuadrado con línea punteada en Figura 9.4) que cumplía con las condiciones para la instalación de la Estación Glaciológica O'Higgins, en especial por el tamaño de su área expuesta sin nieve. Este sitio está a unos 10 km de La península del Lago Chico,

desde donde se estima se puede llegar a pie en unos 2 días. Este afloramiento está rodeado por grietas, excepto en un sector por donde es posible acceder desde el *plateau* interior sin problemas.

En la Figura 9.4 se aprecia el mapa original utilizado en la planificación del proyecto, incluyendo áreas con grietas y posibles sitios para la instalación de estaciones glaciológicas. Allí se ve un afloramiento rocoso (*nunatak*) demarcado con un diamante rojo, donde se instaló la Estación Glaciológica denominada Témpano (Figura 9.5).

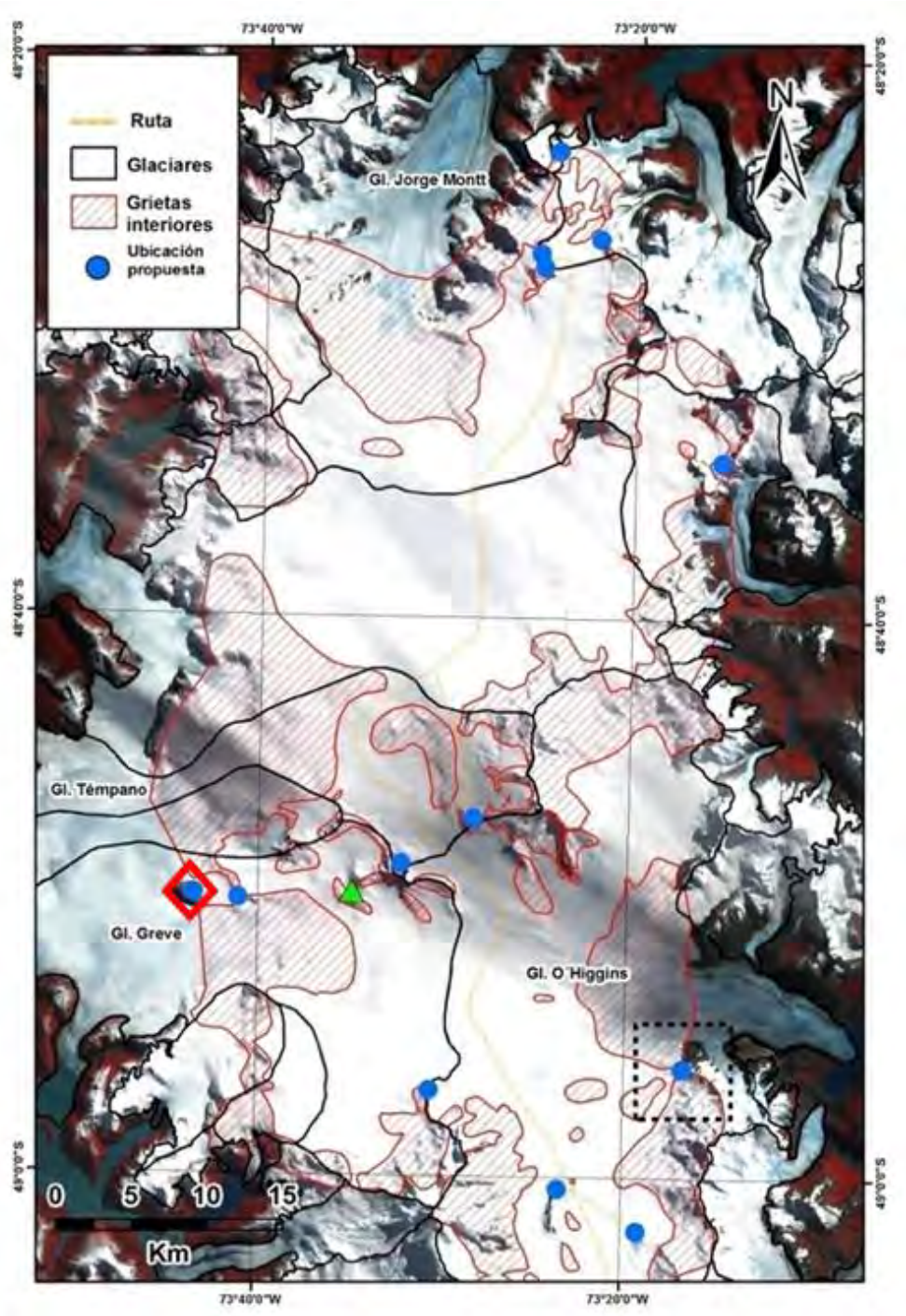


Figura 9.4 Los puntos azules corresponden a lugares evaluados en terreno para la instalación de los módulos. El triángulo verde corresponde al *nunatak* seleccionado para la Estación Glaciológica Greve. El cuadrado con líneas punteadas, indica el sitio para la estación O'Higgins. El diamante rojo marca el lugar para instalación de la Estación Glaciológica Témpano. En negro divisorias de cuencas glaciares. En línea amarilla, rutas terrestres planificadas para tránsito seguro.



Figura 9.5 *Nunataks* o afloramientos rocos en la zona norte de CHS sobrevolados y evaluados durante la selección de sitios para la implementación de las estaciones glaciológicas (octubre 2014).

9.3 Caracterización geológica del terreno donde se ubican las estaciones glaciológicas

Se realizó un levantamiento geológico de cada sitio en que se instalaron las estaciones glaciológicas, considerando que en la región de estudio se reconocen los afloramientos, complejos geológicos o formaciones, mostrados en la Figura 9.6, los cuales se describen a continuación:

1.- El complejo Metamórfico Andino Oriental (CMAO), predominante en el margen oriental del CHS, está compuesto por esquistos y filitas de cuarzo-muscovita, y en forma subordinada, de mármoles y esquistos verdes. De acuerdo al grado de deformación y la subsecuente preservación, u obliteración de las estructuras sedimentarias de las rocas de este complejo, se reconocen tres asociaciones de rocas metamórficas, que no se diferenciaron cartográficamente en el área de estudio. El CMAO está compuesto de rocas metamórficas fuertemente plegadas como resultado de varias etapas tectónicas o de un tectonismo progresivo. Esta deformación ha obliterado las estructuras sedimentarias originales, generándose esquistos y filitas con metamorfismo que alcanza hasta la facies de esquistos verdes. La segunda asociación de rocas metamórficas corresponde a metasedimentitas de menor grado metamórfico y, si bien están fuertemente deformadas, preservan estructuras sedimentarias que permite identificarlas como turbiditas. Una tercera asociación de rocas metamórficas, corresponde a metasedimentitas bandeadas con bajo grado metamórfico. Posee "capas" de diferentes litologías, alternando meta-areniscas con metapelitas, en contacto a lo largo de planos de la foliación principal, representando la trasposición tectónica de la estratificación [*Herve et al.*, 2008].

2.- El complejo "Batolito Patagónico", predominante en el margen occidental del CHS, comprende una faja plutónica que se extiende por 1700 km, con límite norte aproximado dado por la latitud del Lago Ranco (40°S) y un extremo sur en el Cabo de Hornos (56°S). Su ancho varía desde un mínimo de 20 km hasta un máximo de 200 km (a la altitud del Río Cisnes; *ca.* 47°S). En la zona de estudio los afloramientos del Batolito Patagónico tienen una edad restringida esencialmente al Cretácico Inferior (114-133 Ma). Así, su constitución posee diferentes facies petrográficas que incluyen monzogranitos, granodioritas, monzonitas cuarcíferas de anfíbola y tonalitas [*Hervé et al.*, 2007].

3.- La formación Ibáñez, que está constituida por rocas volcánicas y volcanoclásticas de carácter ácido, sobreyace discordantemente al CMAO, presentando afloramientos de hasta 1500 m de potencia. Las rocas son principalmente piroclásticas y lávicas, de composición riolítica, dacítica y andesítica. Subordinadamente, incluye a la base brechas sedimentarias, conglomerados y areniscas [*Pankhurst et al.*, 2000].

4.- Los depósitos glaciales antiguos, sedimentos de origen glacial, están moderadamente consolidados. Se reconocen depósitos morrénicos, sin estratificación, compuestos por gravas y bloques polimícticos, mal seleccionados y angulosos, inmersos en una matriz principalmente arcillosa, con leve fracción de arena. También, se identifican depósitos glaciolacustres. Actualmente, la mayoría de los depósitos exhibe una morfología aterrazada, parcialmente obliterada por el retrabajo aluvial. Distintos autores han distinguido entre los lagos General Carrera y O'Higgins, al menos cuatro niveles de terrazas glaciolacustres según su altura sobre el nivel del mar [*De la Cruz et al.*, 2004].

5.- Los depósitos glaciales actuales, caracterizados por formas de acumulación reciente de sedimentos en la zona de estudio que

complementan los rasgos de la geomorfología glacial de la región, caracterizados por circos, artesas, valles colgados, rocas aborregadas y topografía de montículos. Predominan los depósitos morrénicos. Morfológicamente es posible distinguir entre morrenas laterales y morrenas terminales. Depósitos fluvioglaciares están formados por el transporte y depósito por cursos de agua generados por deshielos y localmente constituyen abanicos. Depósitos glaciolacustres se interpretan como depositados por aguas de derretimiento de hielo en lagunas situadas delante de un glaciar [*Glasser and Jansson*, 2013].

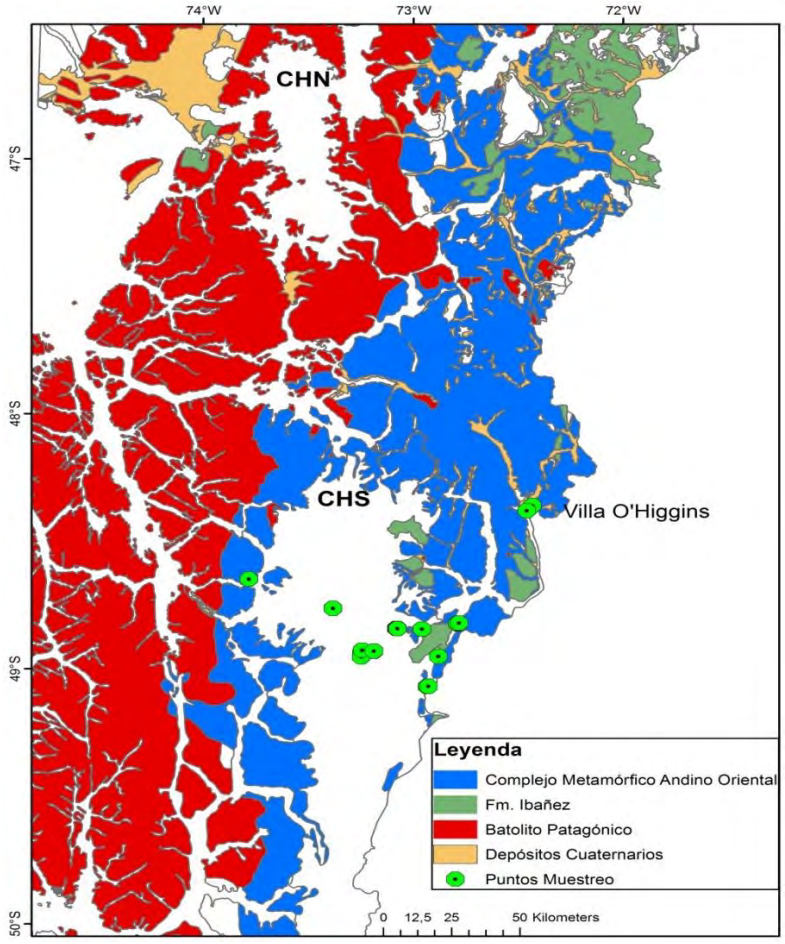


Figura 9.6 Mapa geológico regional de los Campos de Hielo Norte y Sur (CHN y CHS). Se presentan las litologías de la zona de estudio [modificado de *SERNAGEOMIN*, 2003].

En la Figura 2.8 se muestra la ubicación de los *nunataks* donde se instaló la estación glaciológica Greve (48°50'1,98''S, 73°34'53,94''O) y la estación glaciológica Témpano (48°49'58,44''S, 73°43'25,68''O).

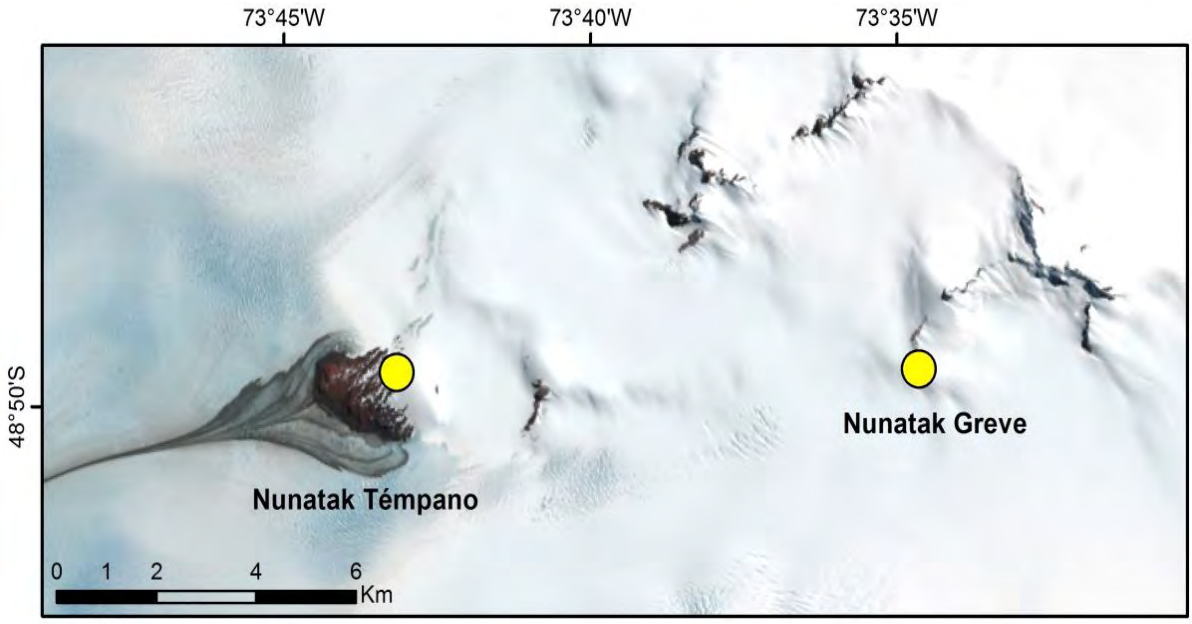


Figura 2.8 Los puntos amarillos señalan la ubicación de los *nunataks* Greve y Témpano. La imagen de fondo corresponde a Landsat 8 del 14 de enero de 2015, proyección UTM, Zona 18S, Datum WGS84.

9.3.1 Estación Glaciológica Greve.

Este lugar corresponde a un afloramiento de roca ígnea plutónica constituida esencialmente por cuarzo, feldespato, hornblenda y biotita. Pertenece al Batolito Patagónico. Se reconoce la litología como un granito de hornblenda y biotita (Figura 9.7). Este tipo de roca se utiliza en construcción debido a su alta durabilidad y densidad. Presenta alta resistencia al desgaste. El granito es una roca magnífica para la sustentación de cualquier tipo de estructura, pues tiene una elevada

resistencia a la compresión. Al ser una roca impermeable es excelente para construcciones en contacto con agua por períodos prolongados.

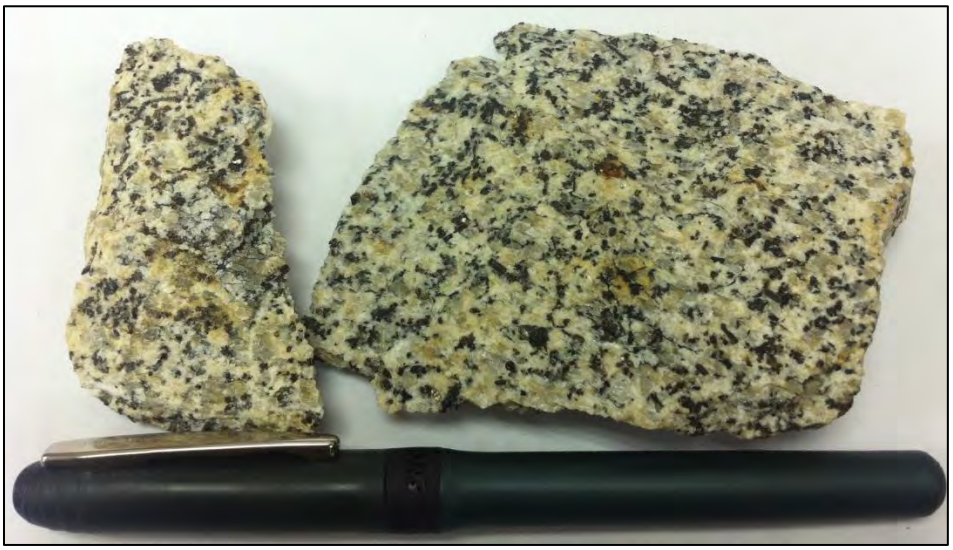


Figura 9.7 Muestra de afloramiento *nunatak* Greve. Granito de biotita y hornblenda.

9.3.2 Estación Glaciológica Témpano.

En el *nunatak* donde se estableció la Estación Glaciológica Témpano se identificaron metaareniscas y metapelitas con bandas de cuarzo correspondientes a las rocas metamórficas del Complejo Metamórfico Andino Oriental (CMAO). Estas rocas se encuentran intensamente comprimidas por lo que evidencian una elevada densidad. Al presentar tamaño de grano muy fino muestra una alta impermeabilidad y baja porosidad, lo que las hace buenas candidatas para construcciones en contacto con agua (Figura 9.8).



Figura 9.8 Rocas metamórficas del *nunatak* Témpano.

9.3.3 Estación Glaciológica O'Higgins.

El *nunatak* donde se implementó la Estación Glaciológica O'Higgins se ubica en las coordenadas 48°55'29,04''S, 73°16'22,92''O (Figura 9.9), el que está dentro de la formación geológica CMAO antes descrita.

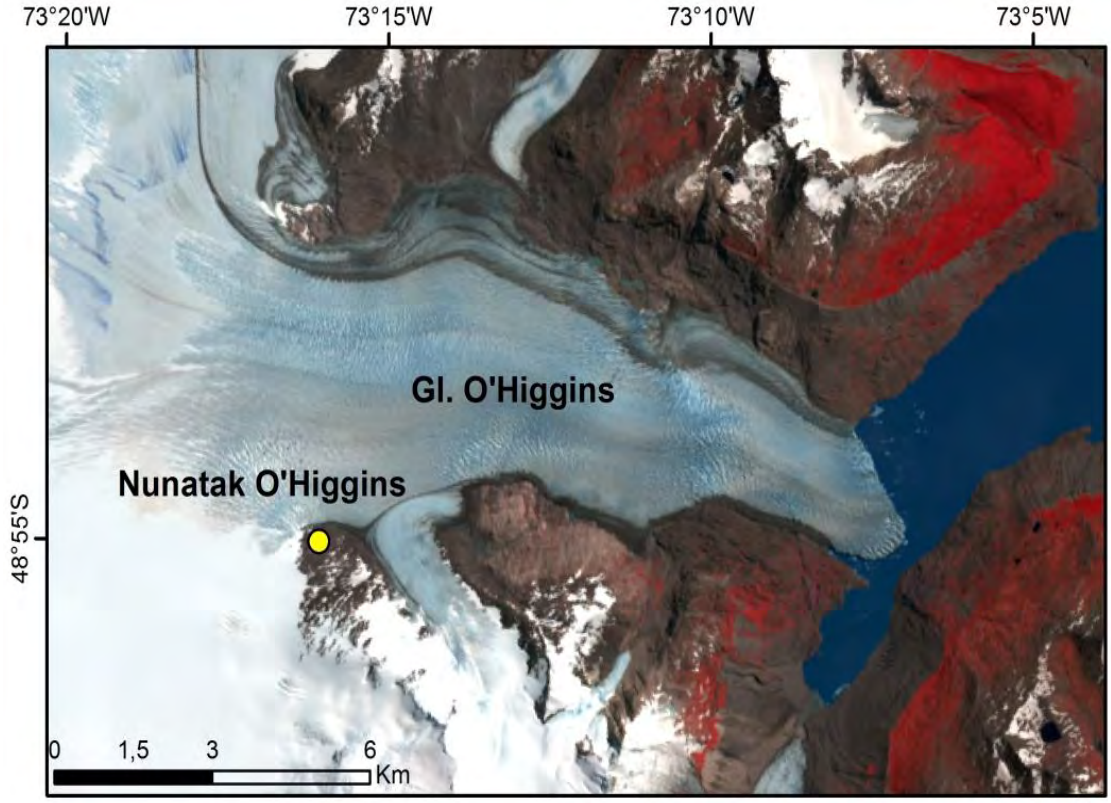


Figura 9.9 El punto amarillo señala la ubicación del *nunatak* O'Higgins. La imagen de fondo corresponde a Landsat 8 del 14 de enero de 2015, proyección UTM, Zona 18S, Datum WGS84.

Este *nunatak* tiene rocas metamórficas de protolito sedimentario. Estas rocas se encuentran estratificadas y se disponen orientadas casi en el plano Este-Oeste y mantean hacia el sureste con 60° aproximadamente. Las mediciones de rumbo y manteo en estos puntos son de N88E/66S, N95E/55SE.

Las litologías principales corresponden a filitas y meta-areniscas. En segundo orden se aprecian afloramientos de mármol (Figura 9.10). Así, las muestras corresponderían a la formación CMAO de los Andes de edad Devónico-Carbonífero. Se destacan secuencias metamorfizadas de turbiditas con facies de '*melange*'.

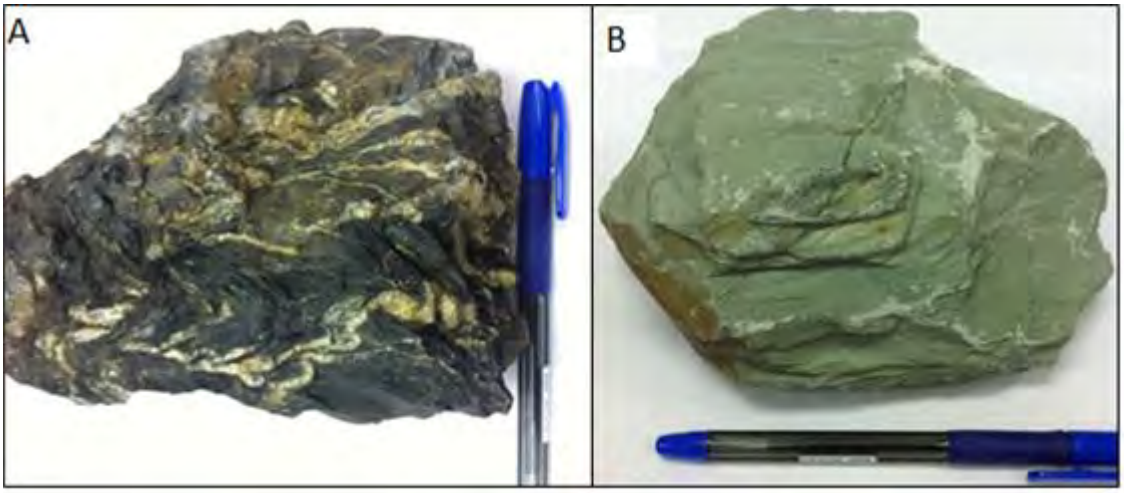


Figura 9.10 Muestras obtenidas en el *nunatak* O'Higgins. A) Roca metamórfica con bandas deformadas de cuarzo. B) Mármol verde.

Los afloramientos se presentan con bandas de cuarzo deformadas, bandas estilolíticas y vetilleo de cuarzo de 1-2 mm hasta 5-10 cm. Se observaron intercalaciones de roca de grano fino oscura (metapelita) y rocas grises de mayor tamaño de grano (Figura 9.11).



Figura 9.11 Intercalaciones de metapelitas con meta-areniscas.

Estas rocas metamórficas presentan alto grado de deformación, lo que quedó registrado en las bandas de cuarzo que se pliegan de acuerdo a esfuerzos preferenciales (Figura 9.12). Estas rocas han sido sometidas a esfuerzos muy intensos, lo que ha generado las bandas deformadas y un aumento en la densidad de la roca. Visto lo anterior, la calidad de la roca sería compatible para la instalación de una estación glaciológica, debido a que se encuentra bien consolidada, presenta elevada densidad y resistencia a la compresión.



Figura 9.12 Afloramiento del CMAO, donde se destaca, en color rojo, las bandas de cuarzo plegadas y deformadas.

9.4 Diseño y construcción de las estaciones glaciológicas.

Considerando la experiencia previa de la UGN de la DGA en el Glaciar San Rafael en Campo de Hielo Norte, se utilizó un diseño similar para la construcción de las estaciones glaciológicas, basado en un conjunto de módulos genéricos semi-curvos, construidos por la Unidad de Arquitectura Extrema de la Universidad Técnica Federico Santa María.

El objetivo de estos módulos habitacionales es permitir y facilitar la logística relacionada con la implementación de estudios científicos en CHS. Tales estructuras sirven de apoyo para la realización de campañas científicas, turísticas o deportivas en esta zona, según disponga la DGA.

Estos diseños fueron modificados por el CECs con el fin de mejorar una serie de deficiencias detectadas, por ejemplo respecto de las puertas, ventanas, sellos, materiales aislantes, redes eléctricas, etc., a partir de sugerencias recogidas al momento de su ensamble y utilización en terreno. Todas estas mejoras fueron oportunamente aprobadas por la DGA.

9.4.1 Base de soporte

La base de los módulos consta de tres secciones metálicas ensambladas a través de perfiles rectangulares, con piso de madera contrachapada impermeabilizado de 6 mm, y recubierto con una capa de goma tipo toperol con superficie antideslizante de 3 mm.

Esta base cuenta con un sistema de soporte ajustable metálico para adaptarse a las diferencias de nivel del terreno. Estas sobresalen de la base para entregar mayor estabilidad y corresponden a perfiles tubulares cuadrados de 50x50 y 40x40 mm, ambos de 3 mm de espesor. Se suman, tornillos niveladores galvanizados (tipo andamio) para un ajuste más preciso. Adicionalmente, cuenta con tensores

(vientos) de acero que se anclan al terreno. Este sistema de anclaje está diseñado para soportar vientos de hasta 200 km/h.

Todas las piezas metálicas del módulo son tratadas con anticorrosivo epóxipo y esmalte sintético marino color naranja internacional marca *Sherwin Williams* (Ral 2009).

9.4.2 Paramentos

Sobre la base armada se ensamblan paramentos curvos construidos en poliéster reforzado con material tejido de fibra de vidrio color naranja internacional especificado con protección anti radiación Ultra Violeta (UV). Cada paramento contempla una ventana redonda de 30 cm, cónica con 2 láminas paralelas de acrílico transparente.

Las uniones de los paramentos poseen sellos de silicona, tanto entre la junta como a lo largo de la junta entre paramentos, lo que permite absorber posibles dilataciones.

Cada paramento y el complejo de base tienen una aislación perfeccionada, de coeficiente de aislación 0.030 o menor que complete los 10 cm de espesor de los paramentos con una densidad de 15 kg m^{-3}. Esta aislación contempla una superficie de acabado resistente por la cara interior de planchas alveolares de policarbonato blanco.

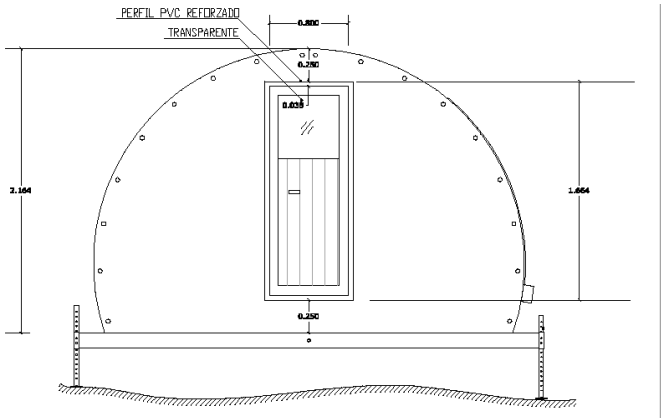
9.4.3 Ventilación

Los módulos poseen dos sistemas de ventilación pasiva mediante conductos de PVC que se comunican con el exterior. El primero consiste en tubos de 20 mm que se ubican en los paramentos verticales frontal y posterior a nivel del piso para permitir la descarga gravitacional de CO^2 (más pesado que el O^2). El segundo es a través de un sistema tipo Venturi que consiste en dos ductos de PVC de 75 mm en forma de T, instalado en la parte superior del semicírculo para que mediante el flujo

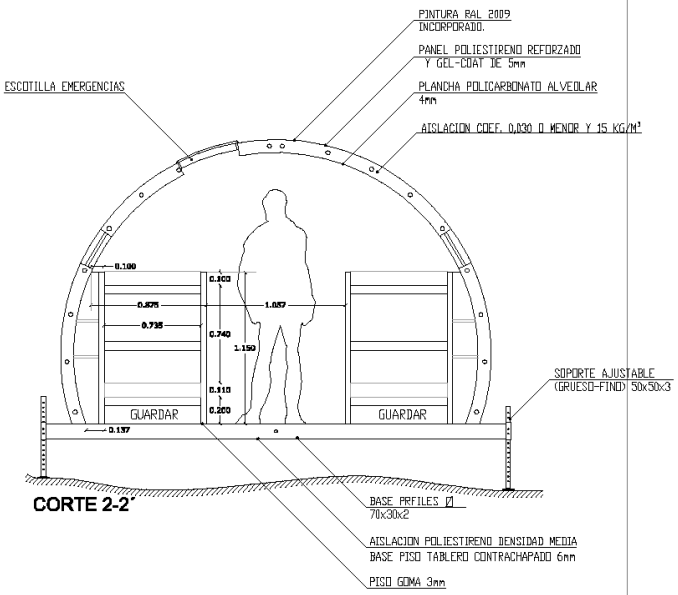
y velocidad del viento exterior aspire el aire interior. Posee un cierre de rosca para cerrar la ventilación cuando se desee.

9.4.4 Planos

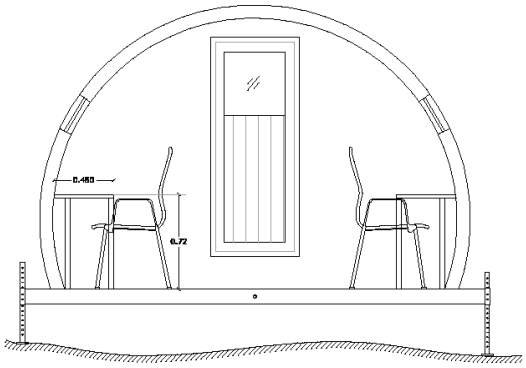
A continuación se presentan los planos arquitectónicos de las estaciones glaciológicas Greve, Témpano y O'Higgins (



ELEVACION FRENTE



CORTE 2-2´



CORTE 1-1´

Figura 9.13, Figura 9.16 y Figura 9.19).

9.4.4.1 Glaciar Greve

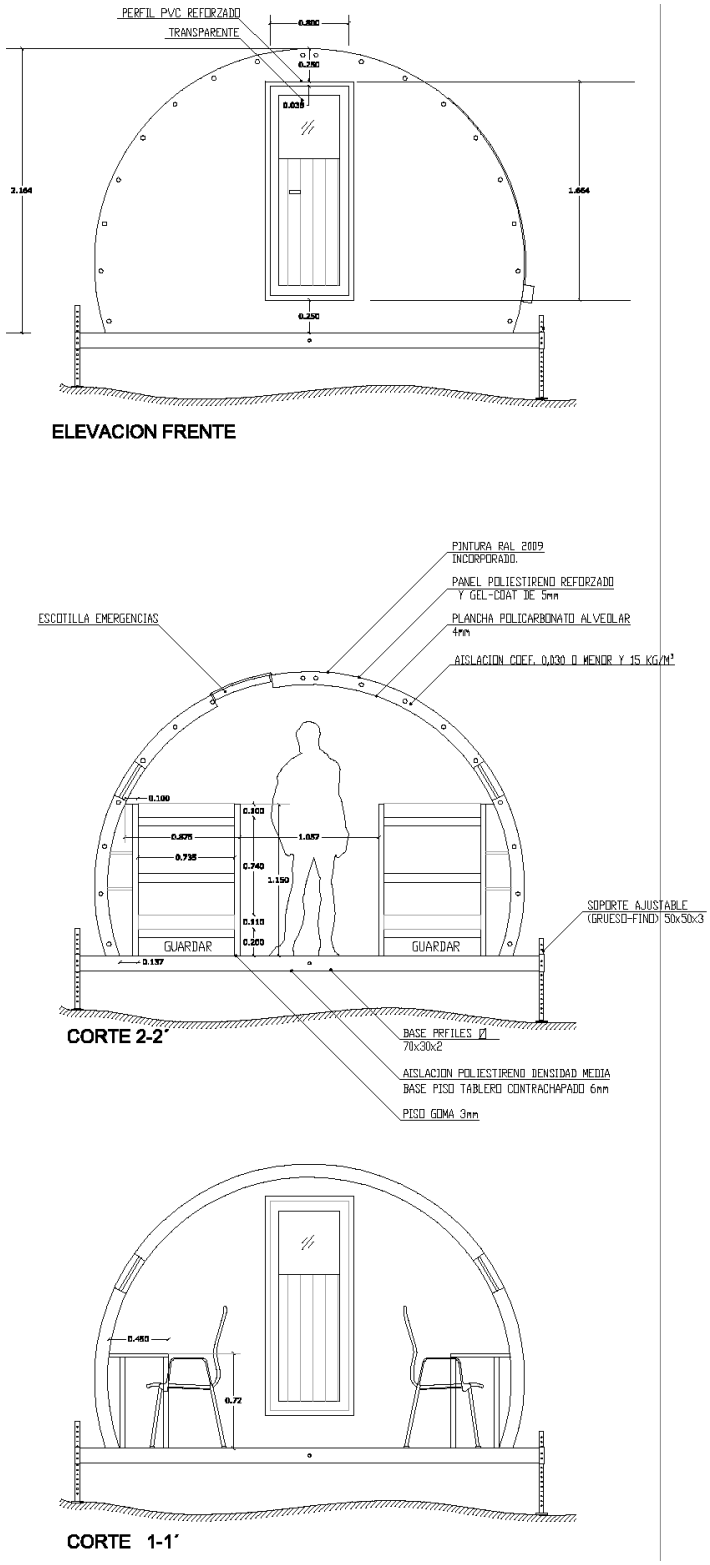
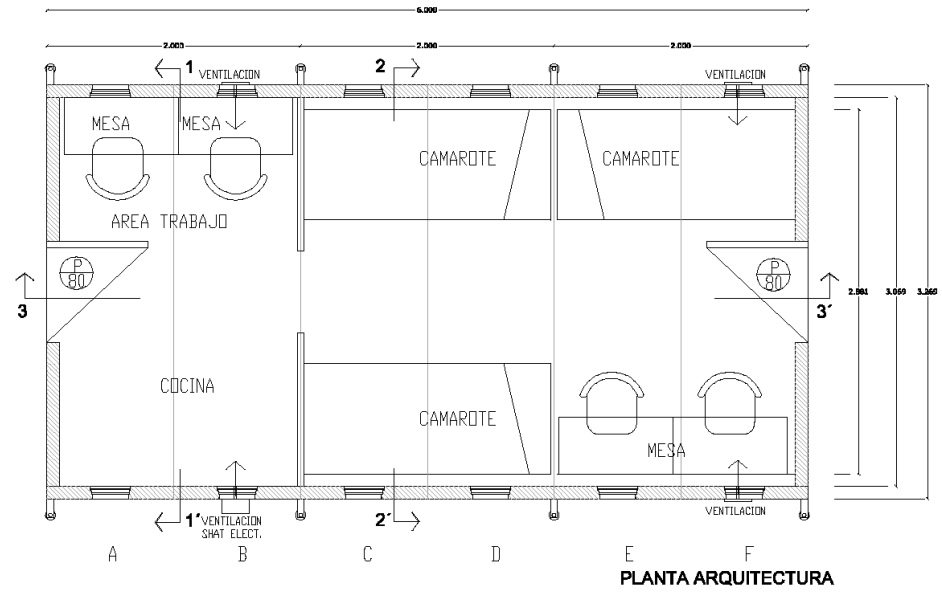
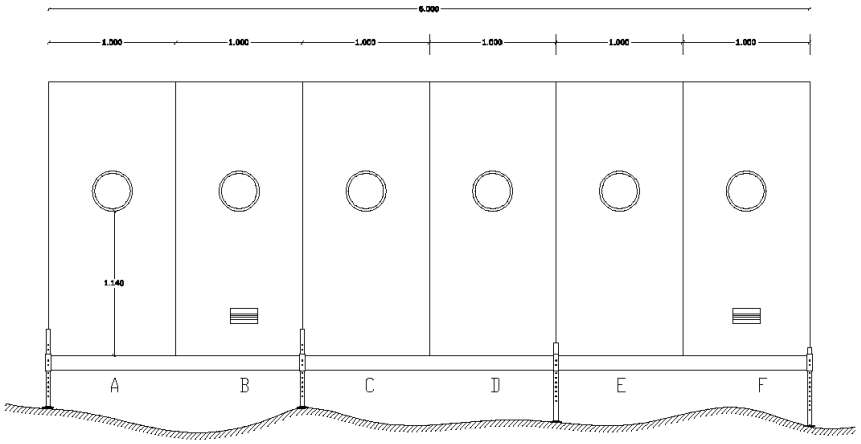


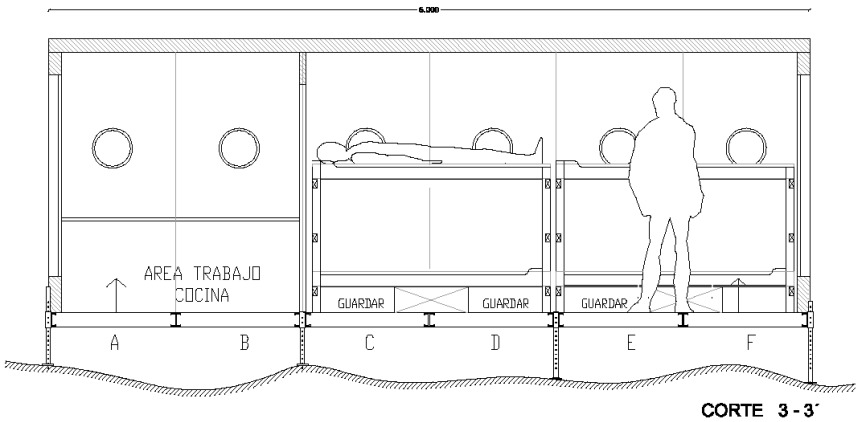
Figura 9.13 Plano arquitectónico (vista frontal) de módulos para Estación Glaciológica en Glaciar Greve.



PLANTA ARQUITECTURA



ELEVACION LATERAL



CORTE 3 - 3´

Figura 9.14 Plano arquitectónico (planta y elevación lateral) de módulo 18 m^2 para Estación Glaciológica en Glaciar Greve.

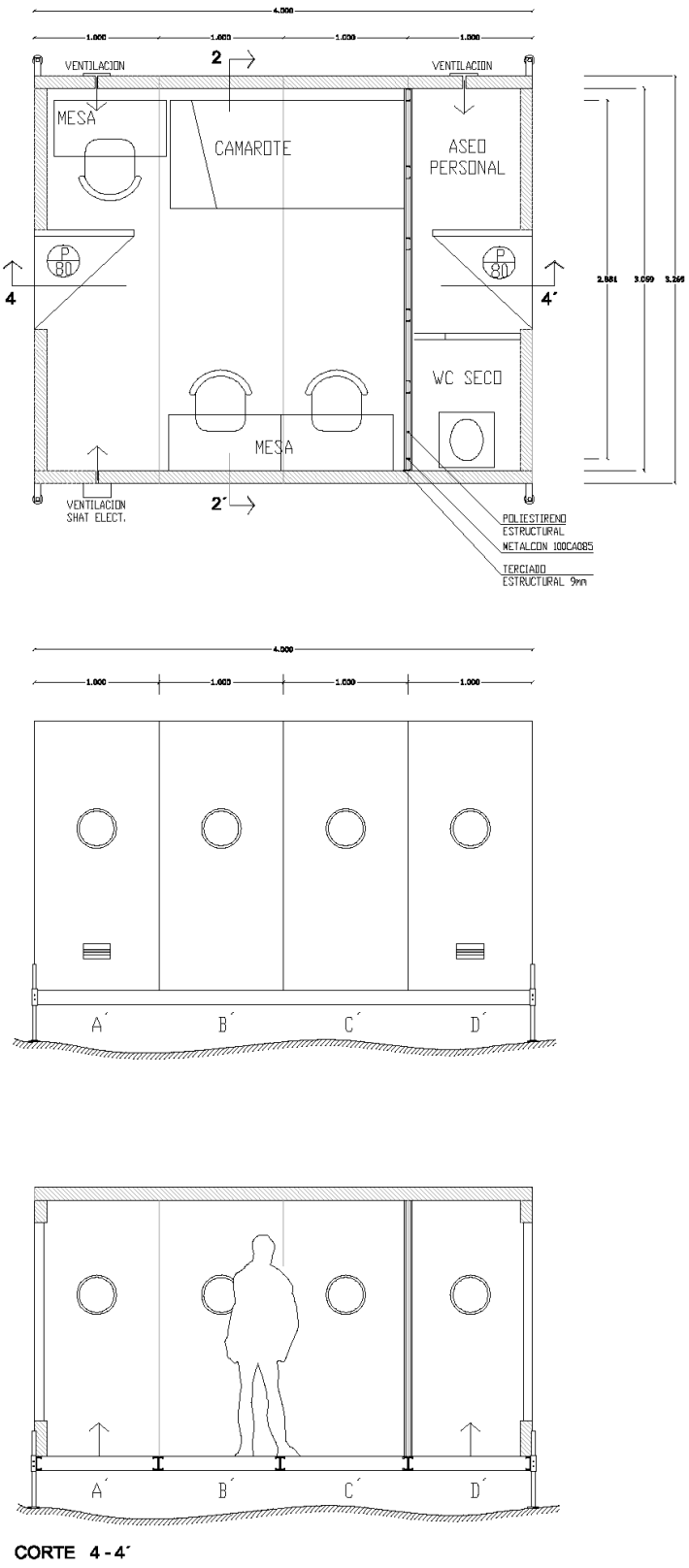


Figura 9.15 Plano arquitectónico (planta y elevación lateral) de módulo 12 m^2 para Estación Glaciológica en Glaciar Greve.

9.4.4.2 Glaciar Témpano

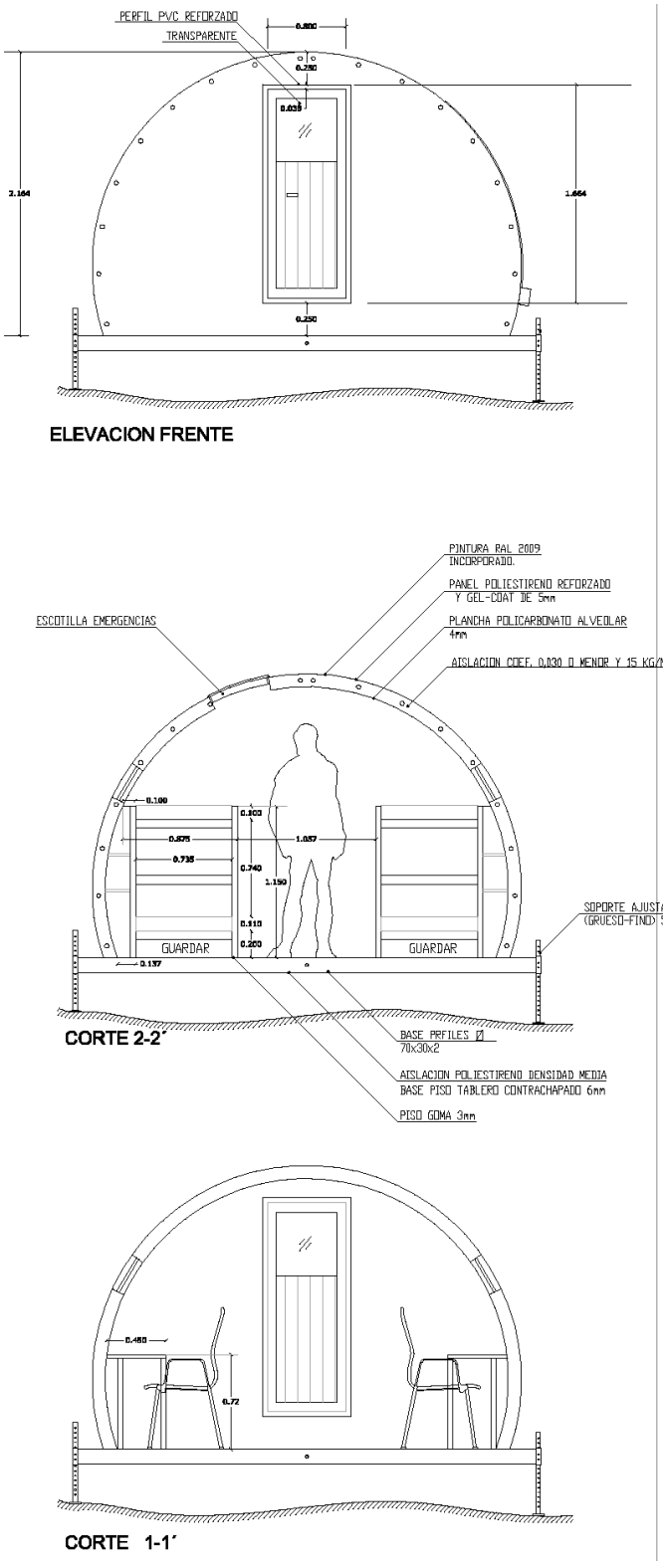


Figura 9.16 Plano arquitectónico (vista frontal) de módulos para Estación Glaciológica en Glaciar Témpano.

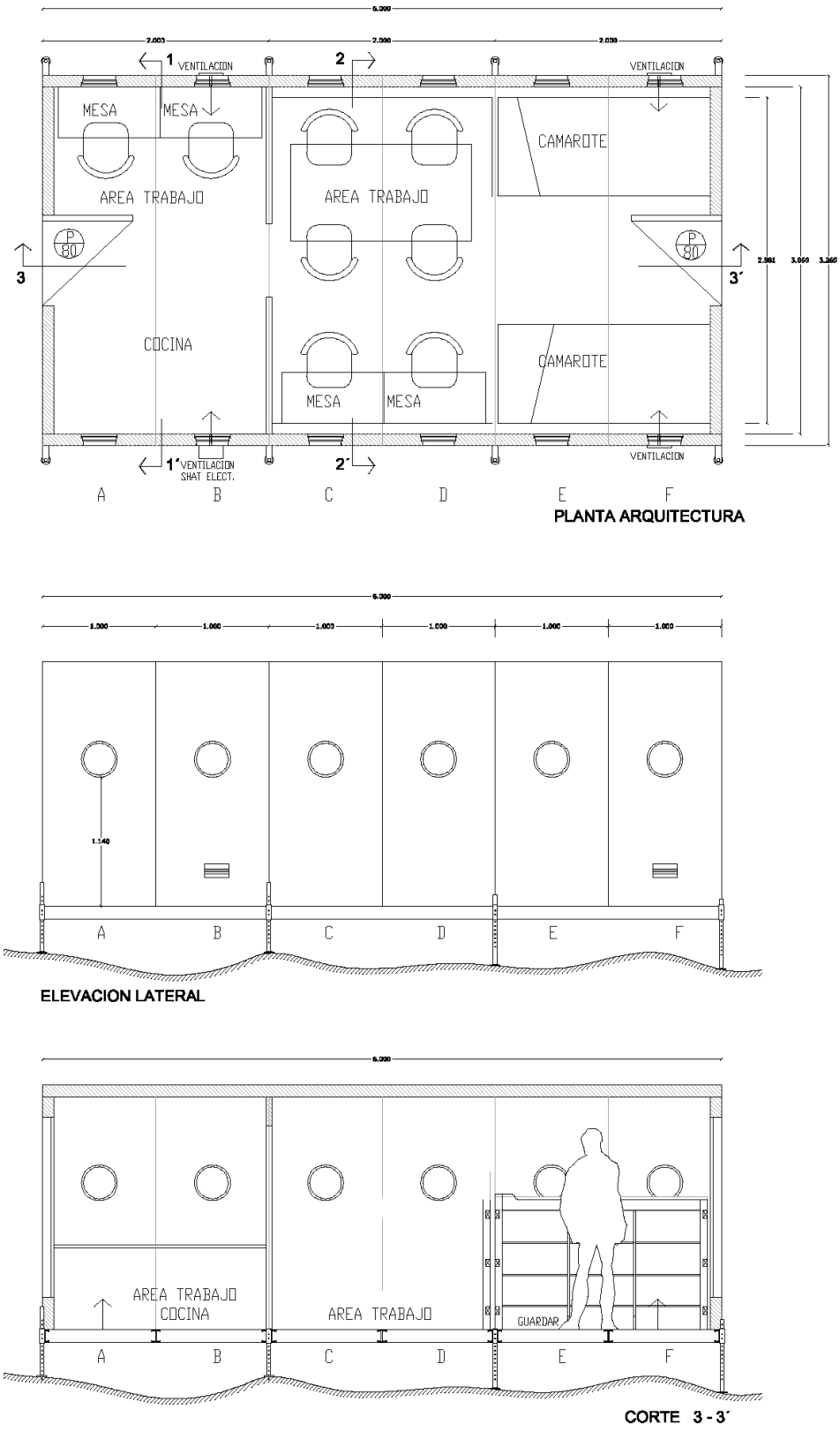


Figura 9.17 Plano arquitectónico (planta y elevación lateral) de módulo 18 m^2 para Estación Glaciológica en Glaciar Témpano.

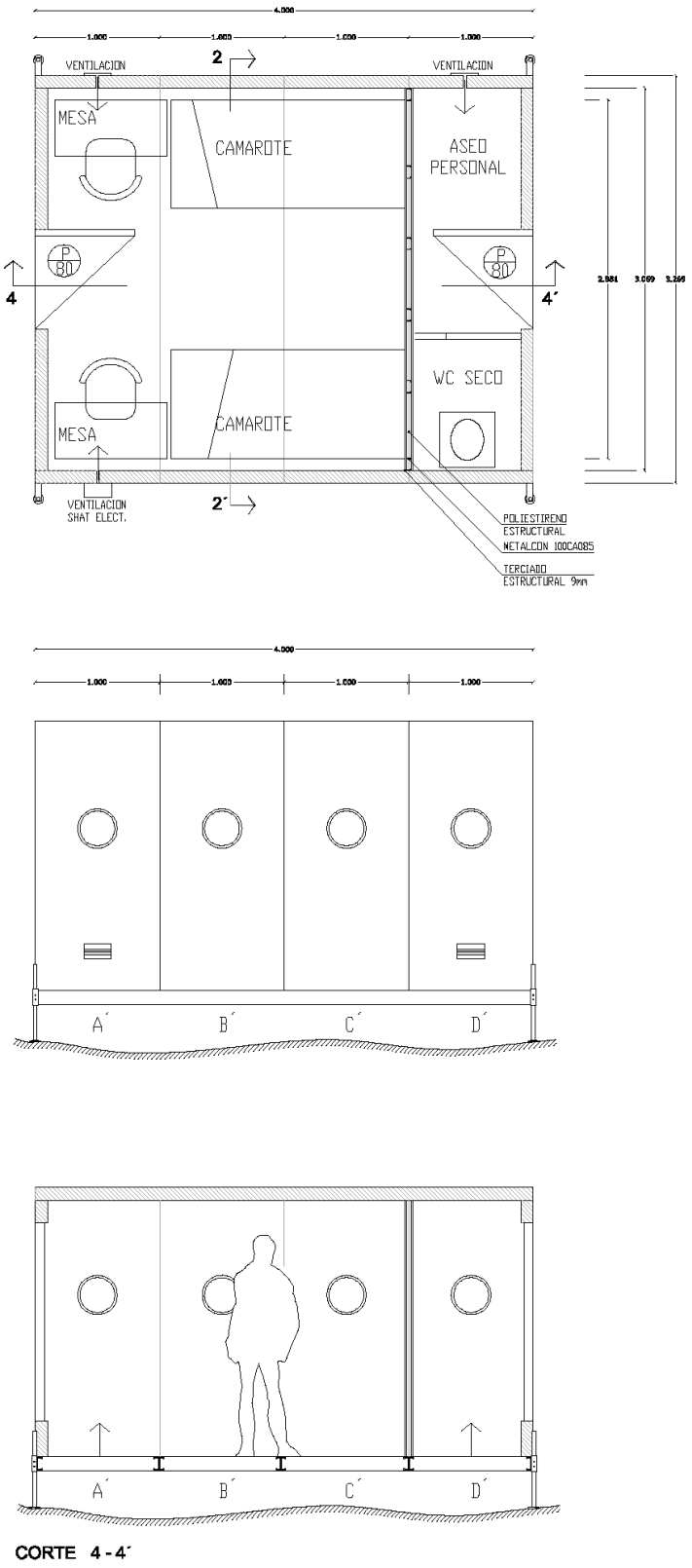


Figura 9.18 Plano arquitectónico (planta y elevación lateral) de módulo 12 m^2 para Estación Glaciológica en Glaciar Témpano.

9.4.4.3 Glaciar O'Higgins

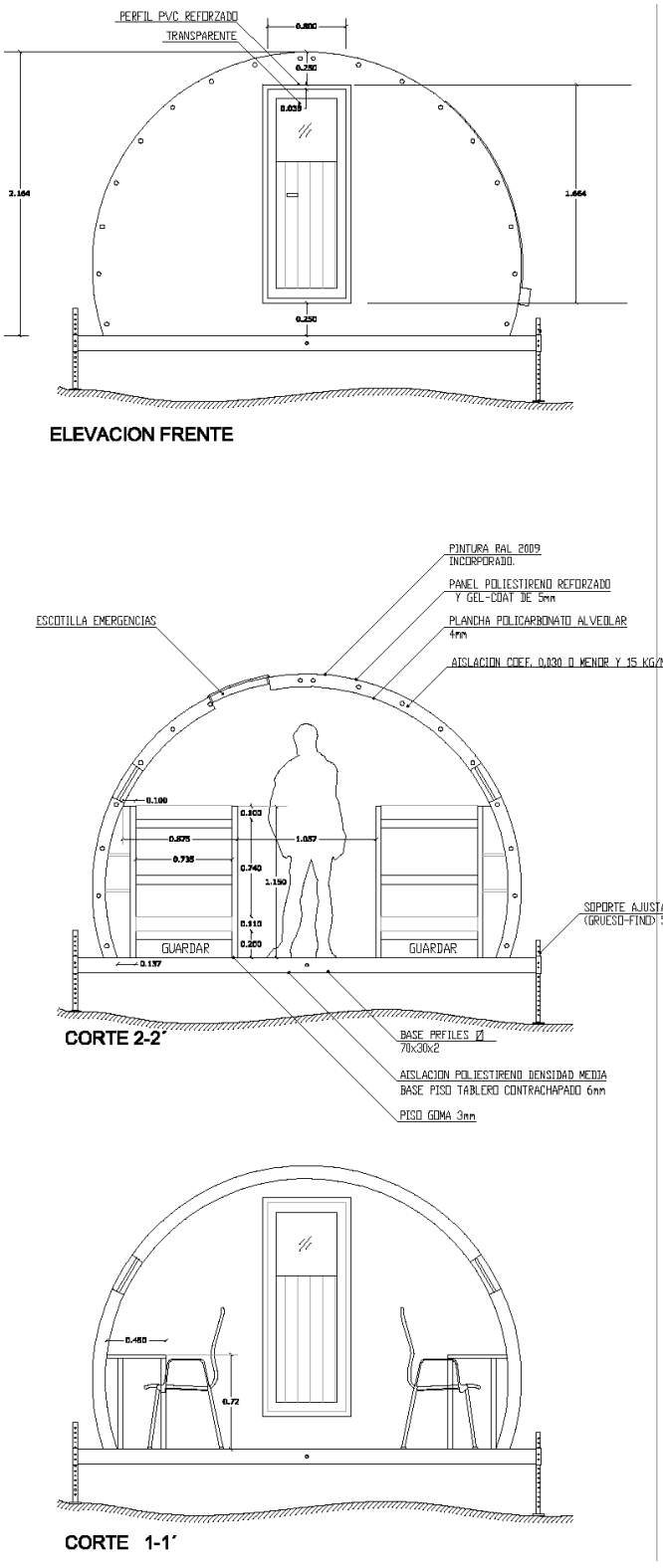


Figura 9.19 Plano arquitectónico (vista frontal) de módulos para Estación Glaciológica en Glaciar O'Higgins.

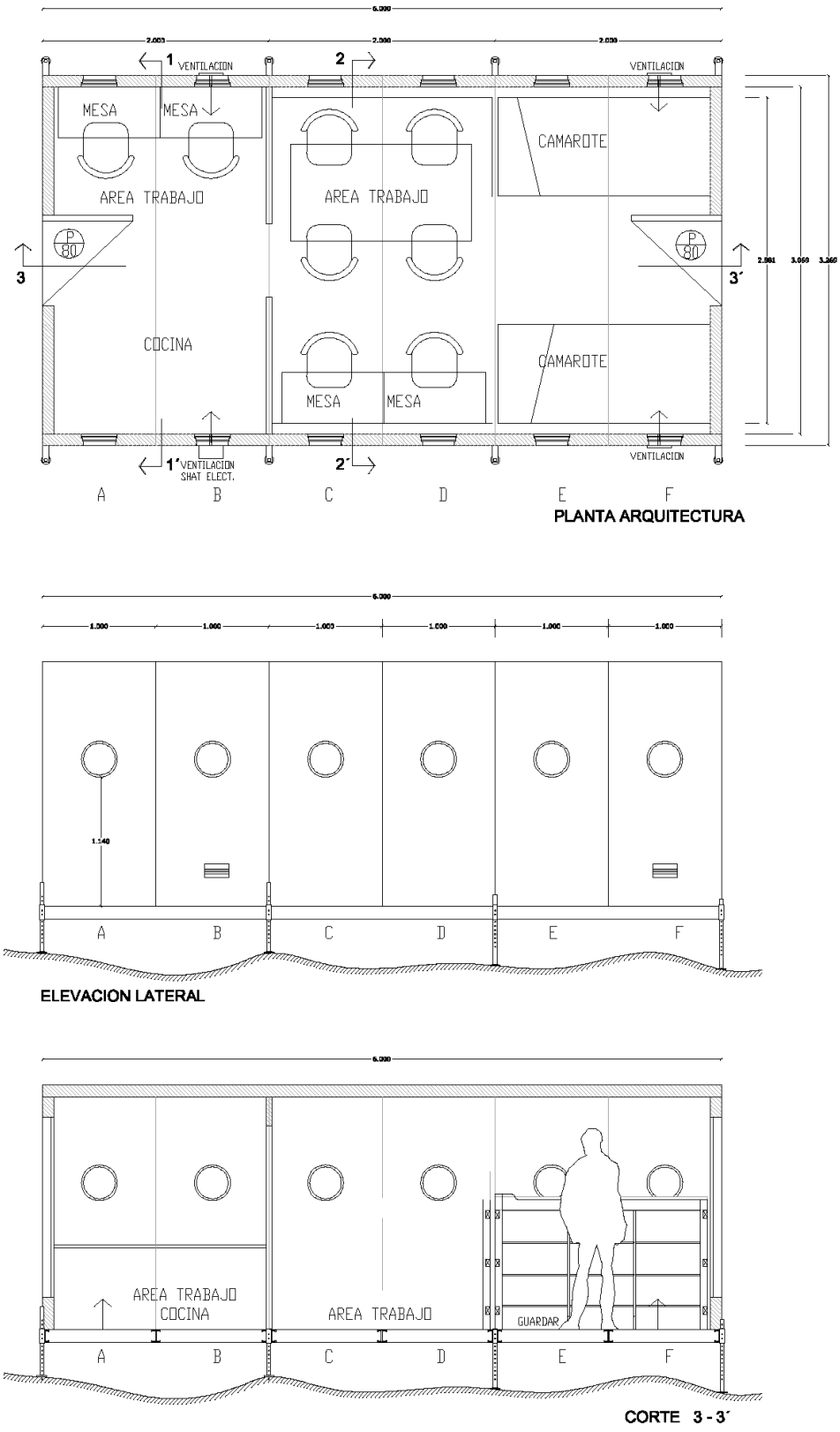


Figura 9.20 Plano arquitectónico (planta y elevación lateral) de módulo 18 m^2 para Estación Glaciológica en Glaciar O'Higgins.

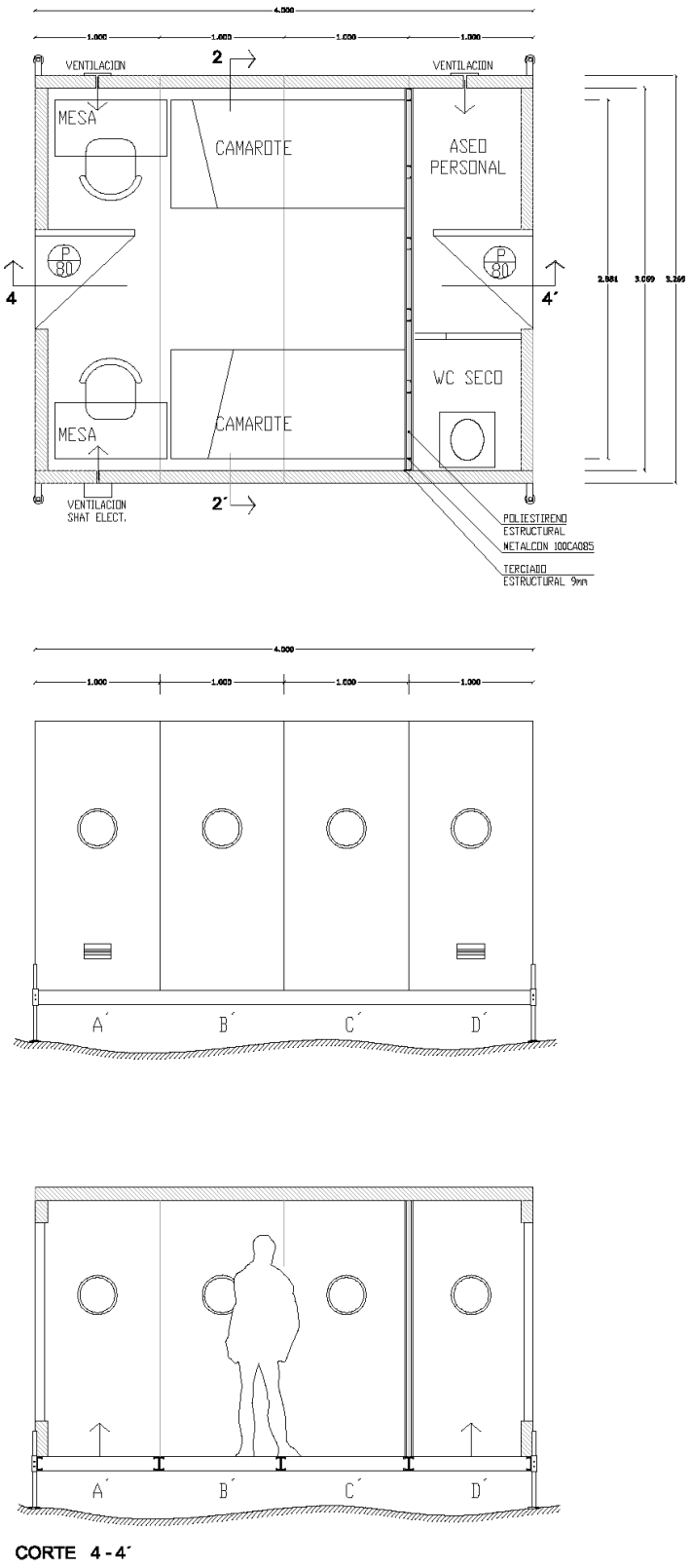


Figura 9.21 Plano arquitectónico (planta y elevación lateral) de módulo 12 m^2 para Estación Glaciológica en Glaciar O'Higgins.

9.5 Instalación de la primera Estación Glaciológica en Meseta

Durante la campaña que se desarrolló en septiembre - octubre de 2014, se realizó la instalación de la primera Estación Glaciológica, que está compuesta por dos módulos, uno de 18 m^2 y otro de 12 m^2 y de cuatro garajes para motos de nieve. Específicamente, el *nunatak* que sirvió de base se encuentra en la zona de acumulación del Glaciar Greve (48°50'1.76"S, 73°34'51.85"O).

La instalación se llevó a cabo entre el 30 de septiembre y el 15 de octubre de 2014. Se instaló un campamento base provisional (Figura 9.22), compuesto por 2 carpas *Weather Heaven* (cocina y bodega), más 6 carpas dormitorio, donde pernoctó el equipo de terreno (9 personas).



Figura 9.22 Campamento provisional instalado en Campo de Hielo Sur (octubre 2014).

Se trasladaron en forma sucesiva desde Tortel como carga colgante los 4 garajes para motos de nieve, las cuatro motos de nieve del proyecto y todos los componentes de los módulos habitacionales. Una vez instalado

el campamento base y asegurado todo el personal, se procedió a seleccionar el sitio exacto de instalación del primer módulo.

El proceso de instalación se inició con la ubicación y limpieza de la roca base seleccionada para el montaje del módulo de 12 m^2 (Figura 9.23a). Luego se armó y fijó la base a esta base rocosa siguiendo una dirección Este-Oeste (Figura 9.23b). Los soportes ajustables fueron nivelados de manera de asegurar la horizontalidad de toda la estructura. Una vez nivelado el piso, se completó la construcción con el montaje de la parte superior del módulo, la cual está constituida por 8 paramentos curvos formando el techo, 4 frontones y 2 puertas por las partes delantera y trasera de la cápsula (Figura 9.23c, d y e). Los tensores con que cuenta la estructura, vientos de tela tipo velcro de alta resistencia y cables de acero, se anclaron a la roca aledaña a los módulos (Figura 9.23e). Una vez armado, se sellaron por completo las uniones, usando espuma de expansión y silicona (Figura 9.23f). Posteriormente y de forma similar fue ensamblado el módulo 18 m^2. El frontón izquierdo de la puerta Este del módulo principal se reforzó en su lado exterior con un panel de terciado marino.

Posteriormente, se ensambló el mobiliario que consiste en un total de 8 camas (4 camarotes), 8 mesas de trabajo y 8 sillas (Figura 9.24). También se instaló un baño seco en el módulo de 12 m^2 (Figura 9.25).

Además de los módulos habitacionales, se implementaron 4 garajes para motos de nieve los que fueron ubicados en la cercanía del módulo principal de 18 m^2 (Figura 9.26). Los garajes fueron anclados en roca con una leve inclinación con el propósito de drenar el agua proveniente del derretimiento de la nieve que podría encontrarse en las motos. Durante toda la ejecución del proyecto y hasta la quinta campaña de terreno (julio 2016) en que fueron trasladadas a Coyhaique, las motos

permanecieron (durante el tiempo sin actividad) en sus respectivos garajes en la estación Greve.

La Figura 9.27 muestra la disposición sobre el *nunatak* de los módulos y los garajes de la Estación Greve.



Figura 9.23 Instalación de los módulos habitacionales, Estación Glaciológica Greve (octubre 2014).



Figura 9.24 Mobiliario durante la instalación en los módulos habitacionales, estación Glaciológica Greve (octubre 2014).



Figura 9.25 Sección baño en el módulo de 12 m^2, Estación Glaciológica Greve (octubre 2014).



Figura 9.26 Garajes para motos de nieve del proyecto, estación Glaciológica Greve (octubre 2014).



Figura 9.27 Estación Glaciológica Greve implementada (octubre 2014).

9.6 Mantenimiento realizado a la Estación Glaciológica Greve

9.6.1 Primer mantenimiento (abril 2015)

En la planificación de la tercera campaña, una de las actividades realizadas fue la mantención de la Primera Estación Glaciológica de meseta. Por ello en cuanto las condiciones de tiempo lo permitieron, el primer vuelo en helicóptero se realizó desde la base de operaciones en Caleta Tortel a la estación glaciológica ubicada en la parte alta del Glaciar Greve con el objeto de verificar el estado de los módulos habitacionales y garajes de motos instalados en durante la segunda campaña (2014). Los módulos, tanto el de 12 m^2 como el de 18 m^2 se encontraron en perfectas condiciones al igual que los cuatro garajes con las motos de nieve (Figura 9.28), lo que confirma que la serie de precauciones y provisiones tomadas en 2014 (selección final del sitio de instalación, aislación, sujeción a roca, diseño y construcción de los módulos y garajes, entre otras) fueron las adecuadas.

Se verificó el estado de operación de las cuatro motos de nieve encontrándose todas en perfectas condiciones. Al mismo tiempo, los sellos de ambos módulos habitacionales fueron revisados y en algunos casos vueltos a reforzar por precaución, aplicando para ello silicona y espuma expandible. Se instaló el sistema eléctrico en el módulo de 18 m^2 y se mejoró la ubicación del panel solar, el que en vez de fijarse a uno de los paneles frontales del módulo habitacional, se instaló en roca con un soporte de panel solar el cual permite girar e inclinar el panel de manera mucho más eficiente. Este esfuerzo de mejora se realizó con el objetivo de asegurar una correcta posición que maximice la carga de la batería la mayor cantidad de horas en el día. Paralelamente, se reforzó la estructura del piso del módulo de 18 m^2 con madera terciada de

mayor grosor y se reemplazó la cubierta de goma. En el módulo de 12 m^2 se fijaron y sellaron los paneles interiores de separación del baño.

El módulo de 18 m^2 cuenta con 3 literas (6 camas), cuatro escritorios con sillas cada uno, sistema eléctrico y cocina con horno. El módulo de 12 m^2 tiene una división interior donde se ubicó el baño seco y cuenta con una litera (dos camas) y dos catres de campaña.



Figura 9.28 Primera Estación Glaciológica instalada en octubre de 2014 en la parte alta del Glaciar Greve. En la fotografía superior, de izquierda a derecha, se observan tres de los cuatro garajes amarillos para motos de nieve, el módulo de 18 m^2 y el de 12 m^2 (abril de 2015).

La zona aledaña a la estación glaciológica se encontró con muy poca nieve en comparación con las condiciones verificadas en octubre de 2014. Se detectó una alta ablación, puesto que en superficie aparecieron muchas más rocas, algunas grietas y hielo azul. Los garajes donde se almacenan las motos, que se encontraban a nivel de la nieve en octubre, ahora estaban a casi 3 m de altura sobre la nieve (Figura 9.29). Se verificó el correcto funcionamiento de cada una de las motos de nieve, confirmando la imposibilidad de operar en condiciones seguras dada la disminución del manto nival ya descrito. Esto impidió que se pudiera realizar labores de radar terrestre, el cual depende del apoyo de motos.



Figura 9.29 Garajes de moto a cerca de 3 m sobre la superficie de nieve en abril 2015.

9.6.2 Segundo mantenimiento (septiembre - octubre de 2015)

Durante la cuarta campaña, el día 21 de septiembre de 2015, las condiciones meteorológicas permitieron trasladar en helicóptero de manera segura un equipo de cuatro personas, desde la base de operaciones en Caleta Tortel, a la estación glaciológica ubicada en la parte alta del Glaciar Greve. Al momento de la llegada a la estación, se encontró una considerable acumulación de nieve sobre y alrededor de los módulos. Los extremos de los módulos con orientación Este promediaban alrededor de 2 m de nieve acumulada, mientras que las caras opuestas (Oeste), acumulaban 1 m de nieve y hielo. Esta situación impedía el acceso a ambos módulos. Luego de varias horas dedicadas al trabajo de despeje de nieve, fue posible acceder a ellos y constatar que tanto el módulo de 18 m^2 como el de 12 m^2 se encontraban en óptimas condiciones para ser habitados (Figura 9.30), verificándose que ventanas, ventilaciones, sellos de impermeabilización, mobiliario, puertas, piso y sistema eléctrico cumplían con todo lo necesario para su correcto funcionamiento.



Figura 9.30 Situación antes (izquierda) y después (derecha) del trabajo de despeje de nieve de módulo de 18 m^2 (arriba) y de 12 m^2 (abajo) de la Estación Glaciológica Greve (septiembre de 2015).

Una vez habilitados los módulos, se procedió al despeje de la nieve acumulada sobre los cuatro garajes de las motos de nieve, constatándose el correcto estado y funcionamiento de las motos de nieve del proyecto (Figura 9.31).

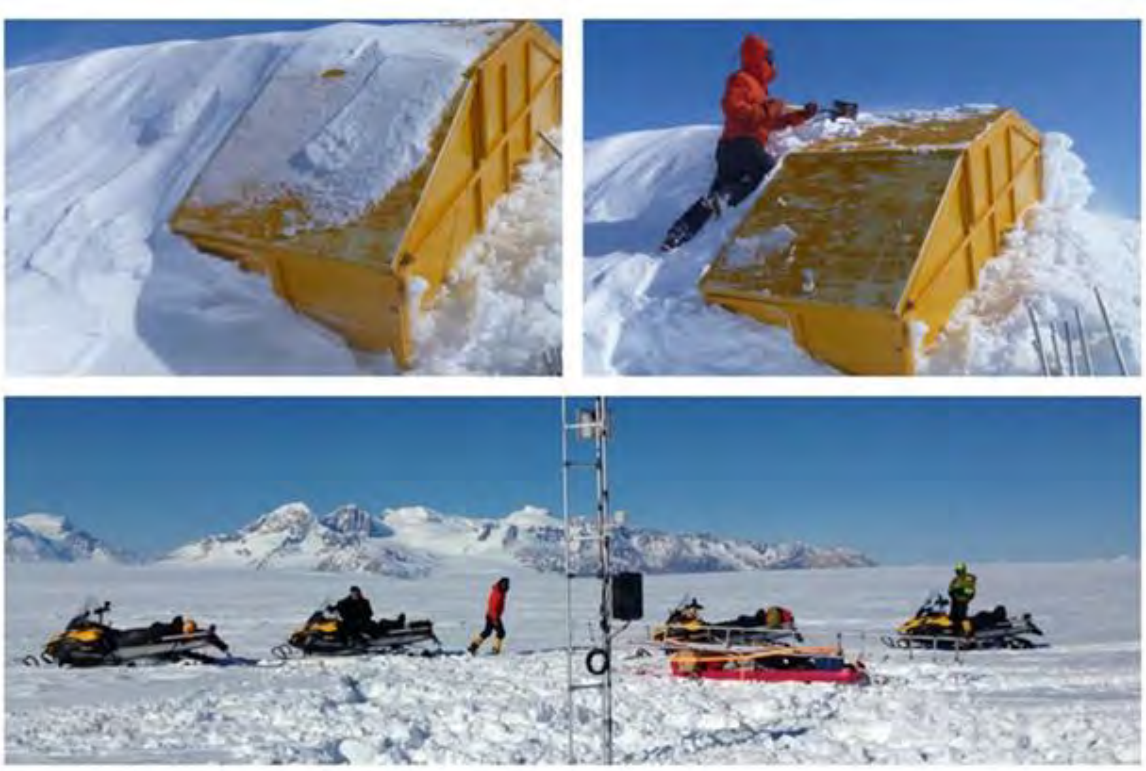


Figura 9.31 Garajes de motos de nieve en Estación Glaciológica Greve (panel superior), motos de nieve en operación (panel inferior) septiembre - octubre de 2015.

9.6.3 Tercer mantenimiento (junio – julio de 2016)

Como parte de la quinta y última campaña en terreno del proyecto, la planificación contempló trabajos en la estación Glaciológica Greve. Luego de un vuelo previo donde se observó desde el aire el estado de las instalaciones, el día 10 de julio se trasladó el equipo de profesionales del CECs a esta estación, donde se constató el estado de conservación de los módulos habitacionales y los garajes de motos de nieve (Figura 9.32 y Figura 9.33). Se encontró que una de las puertas del módulo de 12 m^2 estaba semiabierta, con hielo y nieve en la abertura. Esta abertura se produjo probablemente por fuerte viento. En el interior del módulo había un poco de nieve que fue rápidamente limpiada. No hubo daños en el resto de las estructuras. Una vez terminada la operación, se

mejoró la fijación del cierre de la puerta para evitar una abertura posterior.

En esta visita también se encontró que uno de los pernos de sujeción de un garaje se había cortado. Debido a la imposibilidad de volver a perforar la roca en el mismo punto, se desplazó este garaje hasta una nueva posición rocosa plana, ubicada cerca de la AWS, donde se taladraron nuevos puntos en roca, donde se insertaron los pernos de sujeción necesarios (Figura 9.33). Las motos y el resto de los garajes se encontraban en buenas condiciones.



Figura 9.32 Estación Glaciológica Greve: módulo 18 m^2 (izquierda) y módulo 12 m^2 (derecha) en junio – julio de 2016.



Figura 9.33 Fotos de la reubicación del garaje instalado sobre roca, cerca de estación meteorológica Greve.

Al término de esta campaña de mantenimiento, se deja constancia del inventario existente en la Estación Glaciológica Greve según Tabla 9.1.

Tabla 9.1 Inventario de la Estación Glaciológica Greve (julio 2016).

	Descripción	Cantidad	Observaciones
1	Módulo 18 m^2	1	
2	Módulo 12 m^2	1	
3	Garaje moto de nieve	4	3 fijados a roca cercanos al módulo de 18 m^2 y uno cercano a la torre AWS
4	Sistema eléctrico	1	Montado en módulo de 18 m^2 compuesto por un panel solar de 90W con soporte fijado a roca, una batería de 12V 100mAh, un inversor, 8 ampolletas tipo *led* y 8 enchufes.
5	Lámpara a pila	6	4 en módulo de 18 m^2 y 2 en módulo de 12 m^2.
6	Escala de acceso al módulo	2	Montadas en módulo de 18 m^2, en ambos accesos. El otro módulo no lo requería.
7	Baño seco	1	En módulo de 12 m^2 equipado con artículos de aseo y limpieza y tambor en el exterior, 20 rollos de papel higiénico, 40 bolsas plásticas.
8	Palas metálicas	4	Dos afuera de cada módulo, fijada a uno de los soportes de la base
9	Camarotes	4	3 en módulo de 18 m^2 y 1 en módulo de 12 m^2
10	Colchonetas	8	Colchonetas impermeables para camarotes
11	Cajoneras	8	6 en el módulo de 18 m^2 y 2 en el módulo de 12 m^2
12	Mesa individual	8	6 en el módulo de 18 m^2 y 2 en el módulo de 12 m^2
13	Silla	8	6 en el módulo de 18 m^2 y 2 en el módulo de 12 m^2
14	Balón de gas	2	Cada uno de 15 kg con carga. Uno 100% y el segundo con 50% de carga
15	Cocina	1	Cocina de dos quemadores con conector a balón de gas en módulo de 18 m^2
16	Juego de cubiertos	1	Para 8 personas
17	Juego de ollas y sartenes	1	Para 8 personas
18	Juego de platos, vasos y pocillos	1	Para 8 personas
19	Extintor de fuego	4	2 montados en cada módulo
20	Alimento no perecible	-	Para 8 personas por 10 días aproximadamente

Paralelamente a los trabajos en la estación glaciológica, según las instrucciones de DGA, las cuatro motos de nieve del proyecto fueron trasladadas a Villa O'Higgins en helicóptero, maniobra que se llevó a cabo en cuatro vuelos (Figura 9.34). Posterior al cierre de la campaña, estas fueron entregadas oficialmente a personal de la DGA en Coyhaique (Figura 9.35).



Figura 9.34 Traslado de moto de nieve mediante helicóptero, desde Estación Glaciológica Greve a Villa O'Higgins (junio – julio de 2016).



Figura 9.35 Entrega de las cuatro motos de nieve a personal DGA en la ciudad de Coyhaique (julio de 2016).

9.7 Instalación de la segunda Estación Glaciológica en Meseta

El día 16 de abril de 2015, durante la ejecución de la tercera campaña en terreno, comenzó la instalación de la segunda Estación Glaciológica, específicamente en el *nunatak* ubicado de la línea de equilibrio del plateau donde nacen los glaciares Occidental, Greve y Témpano (48º49'58,6''S, 73º43'24,9''O, 1040 m snm). En este *nunatak* se seleccionaron sitios rocosos que presentaba una condición de superficie lo más regular posible para instalar las bases de los dos módulos habitacionales. Posteriormente se instaló el campamento base compuesto por una carpa *Weather Heaven* de ocho metros de largo (acondicionada como cocina y bodega) y cuatro carpas individuales para el personal (dormitorios), todo montado sobre hielo, tal como se observa en la Figura 9.36, debido a que no había nieve sobre el nunatak y no había lugares rocosos planos para las carpas. Las desfavorables condiciones meteorológicas impidieron trabajar en los tiempos y a la velocidad planificada. La poca visibilidad, las nevazones continuas y el fuerte viento dificultaron los trabajos, prolongando el tiempo destinado a la instalación de los dos módulos a más de 20 días.



Figura 9.36 Campamento montado en el sitio elegido para la implementación de la segunda Estación Glaciológica Témpano (48º49'58.6''S, 73º43'24.9''O, 1040 m snm).

Posteriormente a la selección y preparación del lugar de instalación, se trasladó la totalidad de las partes y piezas en cuatro vuelos de helicóptero (Figura 9.37). Luego se ensamblaron las bases de los módulos para ubicarlos sobre la roca e identificar los puntos que requerían una nivelación del basamento.

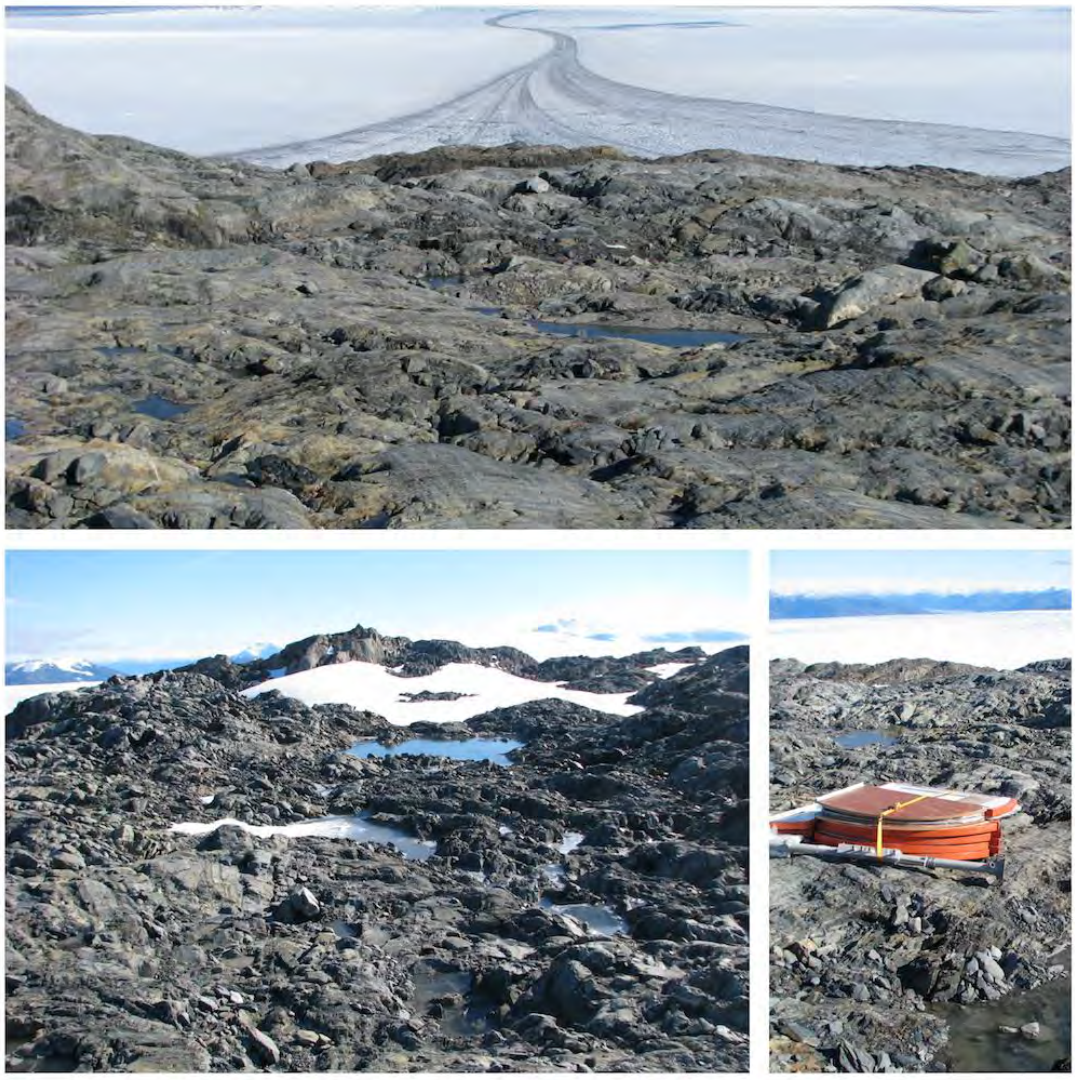


Figura 9.37 *Nunatak* Témpano seleccionado para la instalación de la segunda Estación Glaciológica.

Los soportes ajustables permitieron montar el piso correctamente nivelado. La instalación de este módulo se llevó a cabo entre los días 16 al 26 de abril de 2014 (Figura 9.38). Finalmente, se completó el montaje de la parte superior y lateral de los módulos, la que está constituida por 12 paramentos curvos para el módulo de 18 m^2 y de 8 para el módulo de 12 m^2. Además, se instalaron los 4 frontones y las 2 puertas para las secciones delantera y trasera de cada uno de los módulos.

Una vez completado el ensamble de los módulos, se fijaron los tensores (vientos) de alta resistencia a la roca aledaña a estos. Además, se sellaron las juntas, usando espuma de expansión y silicona. Las Figura 9.39 y Figura 9.40 muestran el estado final del módulo de 12 m^2 y 18 m^2, respectivamente, los cuales quedaron separados entre sí por una distancia aproximada de 10 metros (Figura 9.41).



Figura 9.38 Imágenes de la etapa de nivelación del basamento rocoso e instalación de las bases de soporte del módulo de 18 m^2, Estación Glaciológica Témpano (abril 2015).



Figura 9.39 Módulo de 12 m^2 instalado en el *nunatak* ubicado cerca de la línea de equilibrio del Glaciar Témpano (abril 2015).



Figura 9.40 Módulo de 18 m^2 instalado en el mismo *nunatak* del Glaciar Témpano (abril 2015).



Figura 9.41 Segunda Estación Glaciológica instalada en la zona de acumulación del Glaciar Témpano (abril 2015).

Una vez instalados y asegurados ambos módulos, se procedió al ensamblado y montaje del mobiliario. Para el módulo de 12 m^2 consiste en dos camarotes (4 camas), 4 cajoneras para los artículos personales y dos escritorios con silla cada uno. Además se instaló y selló una división interna que deja independiente un espacio de 3 m^2 donde se instaló un baño seco (Figura 9.42).



Figura 9.42 Vistas del mobiliario instalado en el interior del módulo de 12m^2 de la Estación Glaciológica Témpano. Un tercio del módulo se dividió para la instalación del baño (abril 2015).

En el interior del módulo de 18 m^2 se instalaron dos divisiones, dejando así tres secciones de 6 m^2 cada una. En la primera ubicada en uno de los extremos, se instaló una cocina a gas con horno, una mesa, el menaje necesario para 6 personas y las cajas de almacén de alimentos.

En la sección media se instaló el comedor y área de trabajo compuesto por una mesa con cuatro sillas y dos escritorios con una silla cada uno. Finalmente en la última sección se montaron dos camas altas, debajo de las cuales se guardaron materiales, equipos y el sistema eléctrico. (Figura 9.43).

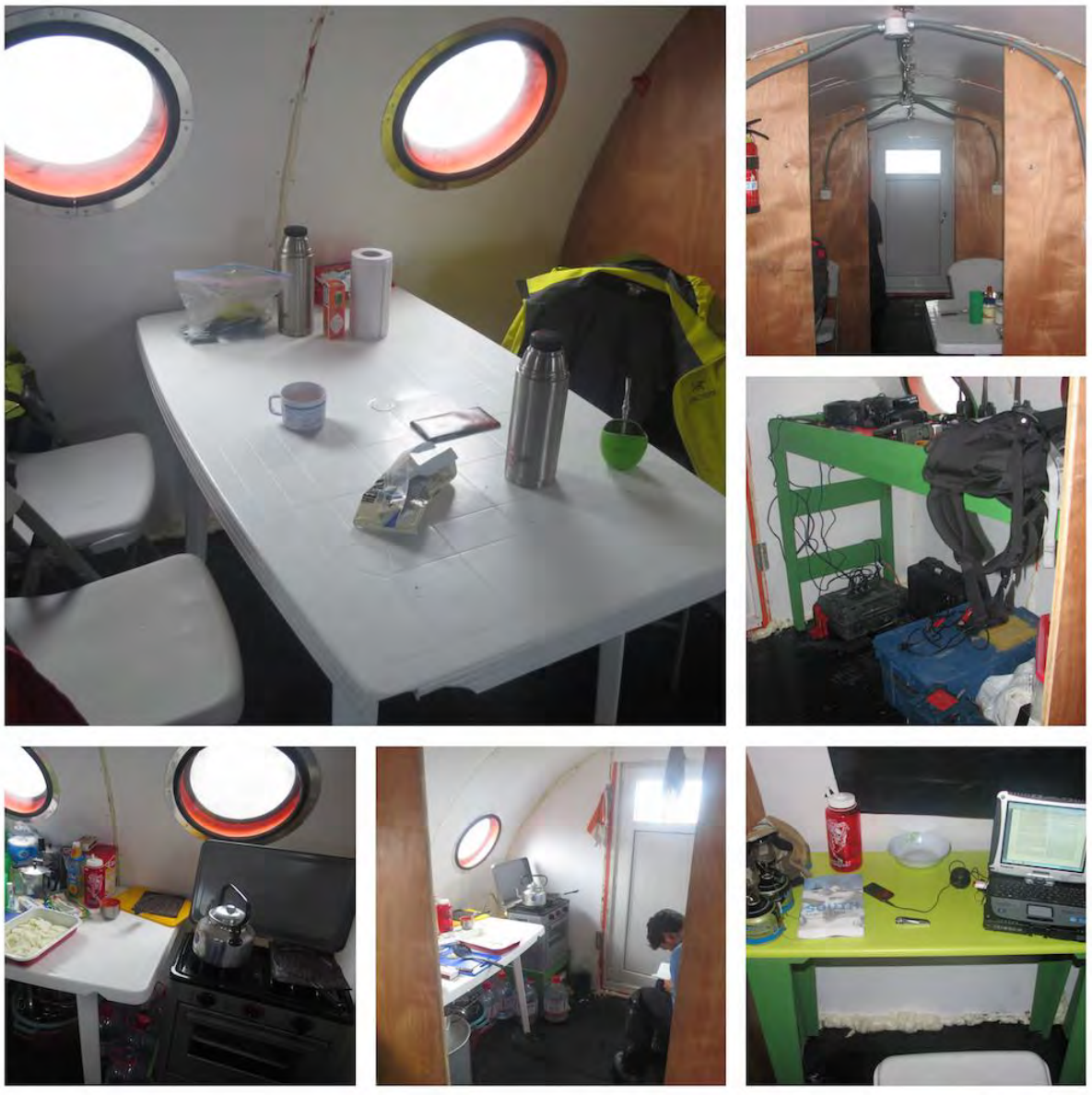


Figura 9.43 Imágenes de las secciones y mobiliario en el interior del módulo de 18 m^2, Estación Glaciológica Témpano (abril 2015).

9.8 Mantenimiento realizado a la Estación Glaciológica Témpano

9.8.1 Primer mantenimiento (septiembre - octubre 2015)

El día 22 de septiembre un equipo de profesionales del CECs inició las labores de mantenimiento de los dos módulos que componen esta estación, los que se encontraban totalmente cubiertos de nieve (Figura 9.44 y Figura 9.45), tal como se verificó en el vuelo de reconocimiento del 21 de septiembre. Aun cuando la acumulación de nieve cubría la totalidad de los módulos, se priorizó despejar el acceso a ellos y verificar su habitabilidad. Después de un par de hora de trabajo de despeje, la tarea concluyó con éxito permitiendo acceder a los módulos y constatar que ambos se encontraban en perfectas condiciones para su uso (Figura 9.46 y Figura 9.47).



Figura 9.44 Acceso al módulo de 18 m^2 Estación Glaciológica Témpano cubierto por nieve (septiembre 2015).



Figura 9.45 Trabajos de despeje de nieve en la Estación Glaciológica Témpano (septiembre de 2015).



Figura 9.46 Interior del módulo de 12 m^2, Estación Glaciológica Témpano (septiembre de 2015).



Figura 9.47 Interior del módulo de 18 m^2, Estación Glaciológica Témpano (septiembre de 2015).

9.8.2 Segundo mantenimiento (junio - julio 2016)

Durante la quinta campaña, en el mes de julio se volvió a acceder a la Estación Glaciológica Témpano. Se constató así el buen estado de los módulos al igual que el sistema eléctrico y estructuras internas. La Figura 9.48 muestra una vista general exterior de la estación glaciológica, mientras que la Figura 9.49 y Figura 9.50 presentan una vista interior del módulo de 12 m^2 y 18 m^2, respectivamente.



Figura 9.48 Estación Glaciológica Témpano: módulo 12 m^2 (izquierda) y módulo 18 m^2 (derecha) (julio de 2016).



Figura 9.49 Interior del módulo de 12 m^2 en Estación Glaciológica Témpano (julio de 2016).



Figura 9.50 Interior del módulo de 18 m^2 en estación glaciológica Témpano (julio de 2016).

Al término de esta campaña de mantenimiento, se deja constancia del inventario existente en la Estación Glaciológica Témpano según Tabla 9.2.

Tabla 9.2 Inventario de la Estación Glaciológica Témpano (julio 2016).

	Descripción	Cantidad	Observaciones
1	Módulo 18 m^2	1	
2	Módulo 12 m^2	1	
3	Sistema eléctrico	1	Montado en módulo de 18 m^2 compuesto por un panel solar de 90W con soporte, una batería de 12V 100mAh, un inversor, 8 ampolletas led y 8 enchufes.
4	Escala de acceso al módulo	2	una en el módulo de 18 m^2 y la otra en el de 12 m^2. Las otras puertas no lo requerían.
5	Baño seco	1	En módulo de 12 m^2 equipado con artículos de aseo y limpieza y tambor plástico, 15 rollos de papel higiénico, 40 bolsas plásticas.
6	Palas metálicas	4	Dos afuera de cada módulo, fijada a uno de los soportes de la base
7	Camarotes	2	2 en módulo de 12 m^2
8	Cama alta	2	2 en módulo de 18 m^2
9	Colchonetas	6	Colchonetas impermeables para camarotes
10	Cajoneras	4	4 en el módulo de 12 m^2
11	Mesa plástica	2	Una instalada en la cocina y la otra en el sector comedor
12	Mesa individual	4	2 en el módulo de 18 m^2 y 2 en el módulo de 12 m^2
13	Silla	8	6 en el módulo de 18 m^2 y 2 en el módulo de 12 m^2
14	Balón de gas	1	Balón de 15 kg con carga de 70%
15	Cocina	1	Cocina de dos quemadores con horno y conector a balón de gas en módulo de 18 m^2
16	Juego de cubiertos	1	Para 6 personas
17	Juego de ollas y sartenes	1	Para 6 personas
18	Juego de platos, vasos y pocillos	1	Para 6 personas
19	Extintor de fuego	4	2 montados en cada módulo
20	Alimentos no perecibles	-	Para 6 personas por 10 días aproximadamente

9.9 Instalación de la tercera Estación Glaciológica en Meseta

Los módulos habitacionales para la Tercera Estación Glaciológica se montaron previamente en dependencias del CECs en Valdivia, en el mes de abril de 2015 (Figura 9.51), con la finalidad de verificar detalles y comprobar el correcto ensamblaje de cada una de sus piezas.



Figura 9.51 Módulos habitacionales correspondientes a la Tercera Estación Glaciológica en meseta de CHS, en proceso de montaje y verificación en dependencias del CECs en Valdivia (abril de 2015).

El día 7 de octubre de 2015 se trasladó el primer grupo de profesionales hasta la zona alta del Glaciar O'Higgins, para verificar las condiciones apropiadas del terreno (topografía, acceso, geología, pendiente). Luego, se instaló el campamento base, compuesto por dos carpas comunes acondicionadas como cocina/comedor y bodega/baño respectivamente, y seis carpas individuales (Figura 9.52).



Figura 9.52 Campamento base en la zona alta del Glaciar O´Higgins (octubre de 2015).

Una vez instalado el campamento, y después de un período de inestabilidad post frontal de dos días (Figura 9.53), se realizó el traslado aéreo de las herramientas y estructuras necesarias para la construcción y ensamblaje de la tercera estación glaciológica, mediante siete viajes de helicóptero desde Villa O`Higgins.



Figura 9.53 Campamento base durante una jornada de fuertes vientos y precipitación sólida (octubre 2015).

La mejora parcial de las condiciones meteorológicas permitió seleccionar el lugar específico para la instalación de ambos módulos, para luego

comenzar las tareas de fijación y nivelación de las bases del módulo de 18 m^2 (Figura 9.54) y 12 m^2 (Figura 9.55).



Figura 9.54 Instalación de bases del módulo de 18 m^2 en la zona alta del Glaciar O'Higgins: Nivelación de base (arriba) y su fijación a roca (abajo) (octubre de 2015).



Figura 9.55 Instalación de bases del módulo de 12 m^2 en la zona alta del Glaciar O'Higgins (octubre de 2015)

Una vez instaladas las bases, y debido a la ocurrencia de varios días de intensas nevazones con fuertes vientos, el equipo de profesionales en terreno debió aguardar en el campamento provisorio hasta que las condiciones meteorológicas permitieran un trabajo seguro y continuar con el montaje de los módulos. A medida que el viento fue disminuyendo se montó el módulo de 18 m^2 (Figura 9.56), para luego realizar el sellado interior utilizando poliuretano expandible.



Figura 9.56 Proceso de montaje del módulo de 18 m^2 de la zona alta del Glaciar O'Higgins (octubre de 2015).

Después de varios días de condiciones meteorológicas adversas, se completó la instalación del módulo de 12 m^2 (Figura 9.57).



Figura 9.57 Módulo de 12 m^2 en la zona alta del Glaciar O'Higgins (octubre 2015).

Las tareas que continuaron se enfocaron principalmente en el sellado de ambos módulos (Figura 9.58), para luego proceder al armado del mobiliario en habitaciones, cocina y baño, instalación de los separadores de madera, e instalación y habilitación del sistema eléctrico. De esta forma, la estación glaciológica quedó completamente equipada para su utilización (Figura 9.59).



Figura 9.58 Proceso de aislación e impermeabilización del módulo de 18 m^2. En la zona alta del Glaciar O'Higgins (octubre de 2015).



Figura 9.59 Interior de módulo de 18 m^2 de la zona alta del Glaciar O'Higgins (octubre de 2015).

9.9.1 Primer mantenimiento (junio - julio 2016)

Dentro de las actividades realizadas en la quinta campaña a CHS, se contemplaban trabajos en la Estación Glaciológica O'Higgins, última estación instalada en octubre 2015. La elección de la ubicación y las previsiones tomadas durante el ensamble de cada módulo fueron clave, al verificar que las instalaciones se encontraban en perfecto estado. Cada módulo, incluyendo su interior y contenido, se encontró totalmente operativo. Los sellos, puertas y ventilaciones funcionan correctamente. La Figura 9.60 muestra una vista general exterior de cada módulo en la estación glaciológica, mientras que la Figura 9.61 y Figura 9.62 presentan una vista interior del módulo de 18 m^2 y 12 m^2, respectivamente.



Figura 9.60 Estación Glaciológica O'Higgins: módulo 18 m^2 (izquierda) y módulo 12 m^2 (derecha) en (julio de 2016).



Figura 9.61 Interior del módulo de 18m^2 en Estación Glaciológica O'Higgins (julio de 2016).



Figura 9.62 Interior del módulo de 12 m^2 en Estación Glaciológica O'Higgins (julio 2016).

Al término de esta campaña de mantenimiento, se deja constancia del inventario existente en la Estación Glaciológica O'Higgins según Tabla 9.3.

Tabla 9.3 Inventario de la Estación Glaciológica O'Higgins (julio 2016).

	Descripción	Cantidad	Observaciones
1	Módulo 18 m^2	1	
2	Módulo 12 m^2	1	
3	Sistema eléctrico	1	Montado en módulo de 18 m^2 compuesto por un panel solar de 90W, una batería de 12V 100mAh, un inversor, 8 ampolletas led y 8 enchufes.
4	Escala de acceso al modulo	2	Sólo una puerta lo requiere, para lo que se dejaron 2 escaleras plegables (una de repuesto)
5	Baño seco	1	En módulo de 12 m^2 equipado con artículos de aseo y limpieza y tambor plástico, 15 rollos de papel higiénico, 40 bolsas plásticas.
6	Palas metálicas	4	Dos afuera de cada módulo, fijada a uno de los soportes de la base
7	Camarotes	2	2 en módulo de 12 m^2
8	Cama alta	2	2 en módulo de 18 m^2
9	Colchonetas	6	Colchonetas impermeables para camarotes
10	Cajoneras	4	4 en el módulo de 12 m^2
11	Mesa plástica	1	Una instalada en la cocina
12	Mesa individual	4	2 en el módulo de 18 m^2 y 2 en el módulo de 12 m^2
13	Silla	8	6 en el módulo de 18 m^2 y 2 en el módulo de 12 m^2
14	Balón de gas	1	Balón de 15 kg con 100% de carga
15	Cocina	1	Cocina de dos quemadores con horno y conector a balón de gas en módulo de 18 m^2
16	Juego de cubiertos	1	Para 6 personas
17	Juego de ollas y sartenes	1	Para 6 personas
18	Juego de platos, vasos y pocillos	1	Para 6 personas
19	Alimentos no perecibles	-	6 personas 10 días

10 Recomendaciones y propuesta para nuevos estudios glaciológicos y climatológicos en Campo de Hielo Sur

Como resultado de la ejecución del proyecto "Línea base glaciológica para el sector norte de Campo de Hielo Sur, glaciares Jorge Montt, Témpano y O`Higgins" (ID 1020-48-LP13), sus resultados, éxitos y dificultades, se proponen nuevos estudios que permitan dar continuidad a la investigación científica de la zona, haciendo uso de la capacidad e infraestructura de DGA ya implementada en Campo de Hielo Sur (CHS) durante el desarrollo de este proyecto.

Lo primero que debe considerarse, es que el objetivo de fondo que se persigue con el tipo de estudios realizados en el marco de este proyecto de Línea base en CHS, es profundizar en el conocimiento del comportamiento del clima regional y de sus relaciones con los glaciares allí existentes. Como se ha visto en los resultados obtenidos, esta caracterización y vinculación, no se pueden abordar con datos representativos de pocos años. Se requieren series más largas, continuas (en la medida de lo posible) y con validación frecuente, lo que implica chequeo de datos, ajustes de programas y cambio de sensores. Con este objetivo de más largo aliento, es necesario que las estaciones, sensores e infraestructura actualmente instalados, sigan operando y se pueda capturar datos en forma continua en el largo plazo. Sólo con estas series de varios años se podrían detectar ciclos anuales, variabilidad interanual y posibles cambios o tendencias.

10.1 De los sensores y mediciones actuales

Las condiciones meteorológicas extremas en la meseta de CHS generaron interrupciones en el funcionamiento de equipos, destrucción de sensores e incluso daños a la infraestructura, todo desde el

momento mismo en que ellos fueron instalados. Estos problemas se fueron subsanando durante las sucesivas campañas, pero, sin un mantenimiento frecuente (semestral o anual como mínimo), todo lo logrado y avanzado podría interrumpirse, impidiéndose la colección de datos y la utilización de los 6 módulos habitacionales instalados en las 3 Estaciones Glaciológicas del proyecto.

En tal sentido, se deben considerar los siguientes aspectos y sus limitaciones, para el desarrollo de nuevas actividades y proyectos en la zona:

10.1.1 Módulos habitacionales/oficina/baño/garajes de motos de nieve

Los módulos habitacionales empleados en este proyecto de 18 m^2 y 12 m^2 son adecuados para el CHS. Se puede diseñar otro tipo de estructuras que tengan menos partes y piezas, y que por ende sean más sencillas de transportar y armar, pero en general se estima que en proyectos futuros deberían seguir utilizándose este tipo de habitáculos.

Esta infraestructura está bien anclada a roca por lo que se estima que no debería sufrir daños estructurales serios en el corto plazo. Las paredes quedaron bien selladas y con sus puertas y ventanas bien ajustadas, pero como ya se detectó con anterioridad, es posible que dadas las condiciones extremas a las que son sometidos, se produzcan roturas de sellos o daños en paredes o filtraciones de agua. Habría que considerar por lo tanto que en campañas futuras deberían materializarse medidas de mantención, en especial con el uso de silicona, poliuretano expandible y eventualmente, materiales para reparación de ventanas o puertas (manillas, bisagras, etc.). Hay que recordar que la radiación de onda corta incidente es muy alta en días

despejados, lo que afectará la vida útil de la fibra de vidrio que compone las paredes de los módulos.

Es necesario destacar que la instalación de baños secos en las tres estaciones glaciológicas fue fundamental para el personal que debió operar en la zona bajo inclementes condiciones climáticas. Estos baños permitieron mantener una moral alta, condiciones higiénicas adecuadas y manejo conveniente de residuos. De hecho, todos los residuos sólidos orgánicos (incluidas fecas, comidas vencidas, restos de frutas, etc.) e inorgánicos (plásticos, materiales, etc.) fueron trasladados vía helicóptero a Villa O'Higgins o Tortel, dependiendo de la estación glaciológica de la que se trataba, desde donde fueron trasladados en camión hasta ser depositados en vertederos autorizados de la zona (Cochrane y Tortel). Las tres estaciones glaciológicas quedaron sin basura de ningún tipo al interior y al exterior de los módulos habitacionales. Esto es importante que sea una norma de operación futura en la zona.

El amoblado existente en el interior de los módulos también está sometido a posible deterioro por fuerte radiación incidente y por humedad. En todas las visitas se ha constatado que los muebles tienen hongos en superficie, los que se eliminan fácilmente con cloro y otros productos de limpieza. Hay que prepararse para una limpieza profunda de los interiores de los módulos en futuras visitas.

Los garajes para las motos de nieve fueron construidos con estructuras metálicas cuyas paredes y pisos están compuestos de terciados marinos gruesos. Estos terciados son muy resistentes, y están bien apernados a la estructura metálica, pero tienen una obsolescencia normal que requerirá reemplazos en el mediano plazo. Lo mismo ocurre con los pernos de cierre de estos módulos, los que deberán cambiarse en

próximas visitas. En la última campaña a la estación Greve, uno de los garajes para motos de nieve debió cambiarse de posición debido a la rotura de uno de sus puntos de anclaje. Esto implica que hay que prepararse para eventuales problemas en el mediano plazo, con perforación en roca nuevos para instalar pernos de anclaje en caso de nuevas roturas.

Respecto de las 4 motos de nieve utilizadas, se estima que el modelo seleccionado y las modificaciones ejecutadas para el sistema de encordamiento han sido óptimas. Se recomienda subir nuevamente estas motos (o similares) y dejarlas en sus garajes en forma permanente.

10.1.2 Torres para estaciones meteorológicas

Las torres donde se instalaron los sensores meteorológicos están bien ancladas a roca, con pernos, cemento y tuercas de ajuste, sin embargo es dable esperar deterioro de estos soportes debido a condiciones extremas de viento y humedad. Las tuercas de estos pernos podrían soltarse, tal como ya ocurrió en la estación Greve. Para evitar esta situación, bastaría con una mantención básica de reemplazo y reapriete. En caso de que algunos pernos se hayan quebrado o soltado de la roca donde fueron insertados, habría que evaluar una relocalización de las torres, debido a que será difícil usar los orificios actuales de las placas metálicas en las bases de las estaciones. Para ello, hay que buscar sectores rocosos aledaños relativamente planos o ir preparados para trabajar rocas con taladros y herramientas de corte. Además, habría que preparar una desinstalación completa de sensores que permita mover la torre con tecles u otros sistemas capaces de levantar los 400 kg de cada estructura.

Las estaciones de respaldo requieren un esfuerzo logístico extra, cuyo aporte real es limitado en términos de datos, por lo que se recomienda eliminar esta instalación en futuros proyectos.

10.1.3 Sensores meteorológicos

Los sensores meteorológicos instalados en el área de estudio han sufrido importantes daños, por lo que han requerido reemplazos constantes durante la realización de este proyecto. En cualquier proyecto futuro por lo tanto deberá planificarse el reemplazo de la mayoría de los sensores, en especial de los anemómetros, que al tener partes móviles son más frágiles.

Dado que las estaciones meteorológicas son instaladas en roca, se sugiere no monitorear los flujos radiativos provenientes de la superficie (onda corta reflejada y onda larga emitida), descartando por lo tanto el uso de sensores como el CNR4. Se sugiere continuar el monitoreo de los flujos incidentes de onda corta o solar y onda larga emitida por la atmósfera hacia la superficie con los sensores CMP3 y CGR3.

Los sensores de temperatura y humedad relativa utilizados actualmente, que varían entre los modelos HC2S3, Thies Clima y aspirados, presentan fallas con la humedad y nieve al no ser 100% herméticos, causando corto circuitos dentro del sensor. Se recomienda utilizar el sensor de temperatura pasiva HMP155A-L de *Vaisala*.

Se sugiere evaluar la utilización de otro tipo de sensores para determinar la precipitación, en complemento de los actuales SR50 que entregan datos con mucho ruido por nieve en deriva. Se propone que se prueben sensores del tipo Geonor.

Se sugiere que las estaciones meteorológicas, tengan sensores del mismo tipo para los niveles de 2 y 4 m de altura (esto, si se decide continuar con la configuración de dos niveles). Por ejemplo si se instala un sensor de temperatura y humedad relativa con pagoda ventilada en 2 m, en 4 m se debe instalar el mismo sensor (marca, modelo) con la misma pagoda ventilada. Se sugiere usar sólo *dataloggers Campbell* Scientific modelos CR850, CR1000 y CR3000.

El sistema de transmisión utilizado actualmente por DGA presenta fallas a causa del deterioro progresivo de las antenas *Yagi*, las cuales no soportan las condiciones meteorológicas del lugar. El sistema probado y propuesto es Iridium 9602-N.

10.1.4 Torres nivométricas

Las torres nivométricas son estructuras cuya duración operativa es de solo algunos meses, debido a que son instaladas en nieve/hielo con flujo, las que son sometidas a fuerte acumulación/ablación. Esto implica que su mantención es difícil desde el punto de vista logístico. La combinación de estos factores augura que desaparezcan bajo la nieve o caigan en caso de que la ablación sea muy fuerte. Se recomienda por lo tanto limitar su uso y reemplazar este tipo de mediciones por pozos de nieve y mediciones de acumulación con un sistema de radar. En caso de usarse, sería fundamental que tengan un SR50 y termistores para nieve y aire adosados, idealmente con transmisión en tiempo real de datos.

10.1.5 Cámaras fotográficas

Las cámaras, con la configuración actual, en general han mostrado un buen funcionamiento, sin embargo los controladores de tiempo han

fallado y los sellos de las cajas pueden sufrir deterioro, por lo que hay que prepararse para cambiarlos. El sistema DigiSnap 2700 perdió su configuración cada cierto tiempo, por lo que se recomienda reemplazarlo.

Se estima sin embargo que las imágenes obtenidas fueron de buena calidad, pero que las ubicaciones de las cámaras fijas deben estudiarse muy bien para que capturen imágenes con ángulos más óptimos para determinar velocidades. Se propone evaluar su re-instalación en sitios nuevos de monitoreo (que se propondrán más adelante), donde habría que hacer levantamientos de topografía superficial de detalle con LiDAR aéreo (desde helicópteros o drones) o terrestres.

10.1.6 Sensores de presión de agua

Los sensores de presión de agua han demostrado ser más resistentes que los sensores meteorológicos, sin embargo se sugiere evaluar bien los sitios de instalación para evitar la acción de témpanos y el excesivo ruido por oleaje.

Se estima que los sensores ubicados en el mar (Jorge Montt y Témpano), entregan datos muy precisos, los que tienen un importante uso para fines de estudios de marea, pero no tanto para estudios glaciológicos. El sensor instalado en el lago O'Higgins está ubicado muy cerca del frente del glaciar, por lo que la frecuente presencia de bloques de hielo ha destruido la estructura en más de una ocasión, por lo que en futuros proyectos deberían buscarse sitios más alejados de los frentes glaciares. Se recomienda no instalar nuevos sensores en el océano, pero sí en lagos con alimentación glacial como se verá más adelante.

Al mismo tiempo, se sugiere considerar que la resolución de los sensores usados en la actualidad (10 minutos) podría mejorar con el uso

de equipos RBR Tide & Wave Loggers. Ahora, si se quiere mantener la resolución pero agregar temperatura, se puede recomendar el sensor de presión OTT PLS.

10.1.7 Vuelos aerotransportados

Respecto de los levantamientos LiDAR y de radar, se estima que la cobertura debe ampliarse, y que en términos de topografía superficial, es conveniente repetir anualmente algunas líneas con datos previos, con el fin de determinar el balance geodésico. En nuevos proyectos en CHS, se recomienda repetir algunas líneas de LiDAR y radar, agregando perfiles longitudinales desde los frentes hasta las zonas de acumulación más altas. Se recomienda además mapear en forma extensiva las áreas dentro de los campos visuales de las cámaras fotográficas terrestres, incluyendo hielo roca circundante.

La captura de fotografías aéreas y la construcción de mosaicos ortorrectificados debería ser una prioridad para mapeos de detalle de frentes glaciares, donde el acceso es difícil y las velocidades del hielo son altas.

10.2 Nuevas variables a medir

Una variable nueva que se recomienda empezar a medir es de carácter geodésico, pero muy relacionada con procesos glaciológicos. Se trata del ajuste isostático debido al proceso de deglaciación en curso (*Glacial Isostactic Adjustment*, GIA). Con el fin de medir este alzamiento tectónico, en varias regiones del planeta se han instalado pines o pernos metálicos, donde se instalan receptores GPS de doble frecuencia, que miden en forma continua por un mínimo de 3-4 días (hasta en forma continua) permitiendo fijar una posición con precisión milimétrica. Al comparar mediciones continuas o interanuales, se logra detectar

cambios verticales y horizontales, lo que se relacionan con el balance de masa glacial existente en cada región. En CHS, este tipo de mediciones han arrojado cambios verticales de decenas de mm por año [*Lange et al.*, 2014]. Con el fin de mejorar y extender este tipo de mediciones en CHS, se propone agregar este nuevo programa de medición en las zonas bajas cercanas a estaciones meteorológicas existentes, donde se recomienda instalar puntos y medirlos por 3-4 días en cada campaña. Considerando que la región patagónica está experimentando una GIA evidente de forma más fuerte en el *plateau* central, se propone que se instalen nuevos puntos para mediciones GPS en *nunataks*, donde se podrían dejar receptores GPS alimentados con baterías y paneles solares midiendo en forma continua.

Otras mediciones que se proponen para una mejor comprensión del comportamiento de glaciares que producen témpanos, es la realización de mediciones batimétricas con sonares o sistemas *Bubble Pulser* [*Koppes et al.*, 2010] cerca de los frentes glaciares y de temperatura/salinidad de la columna vertical del agua. Estos parámetros proveerían de información especialmente relevante para mejorar las estimaciones de calving frontal y del derretimiento subacuático.

Se estima que para obtener velocidades del hielo confiables, es necesario usar otras tecnologías remotas, como el uso de mosaicos construidos con fotografías aéreas asociadas a levantamientos LiDAR de las zonas cercanas a los frentes de los glaciares principales. Estos levantamientos LiDAR pueden ser realizados con drones o desde helicópteros como los usados por el CECs durante la ejecución de este proyecto de Línea Base CHS.

10.3 Propuesta de actualización de equipos y nuevos sitios de medición

El conjunto de mediciones y tareas que deberían continuarse por las razones ya indicadas, junto a las posibles acciones que pudieran adicionarse, implicarán un esfuerzo logístico relevante, por lo que deben equilibrarse los requerimientos de nuevas instalaciones y equipos, con la realización de estudios a partir de los datos obtenidos. Se estima que un proyecto con demasiadas actividades de edificación de infraestructura desvían la atención de la investigación que se requiere.

A continuación se proponen tres prioridades de trabajos futuros incluyendo 4 transectas de medición (Figura 10.1).

10.3.1 Proyecto prioridad 1

Al principio de la ejecución del proyecto de Línea Base (2014) se buscaron sitios de instalación de estaciones de medición y módulos habitacionales en una línea Norte-Sur, desde el frente del glaciar Jorge Montt (latitud 48º15'S) hasta el Glaciar O'Higgins (48º50'S). Si bien se detectaron algunos *nunataks* en la parte alta (meseta) del sector norte del CHS, estos no eran accesibles vía terrestre (grietas o no eran suficientemente amplios como para instalaciones complejas (estaciones meteorológicas y módulos habitacionales).

No obstante lo anterior, se logró una exitosa instalación de una la línea transversal de estaciones, que cubren desde el fiordo Témpanos hasta el lago O'Higgins. Esta distribución se considera satisfactoria para una representación de los principales ambientes de esta parte de CHS, en particular del contraste marítimo versus continental. Esta transecta debe mantenerse y fortalecerse, por lo que la primera prioridad sería la

realización de visitas anuales (mínimo) para reemplazar equipos y chequeo de instalaciones.

Sin embargo, en el extremo norte de CHS sólo se instalaron equipos en las cercanías del frente del Glaciar Jorge Montt (una AWS, un sensor de presión de agua y una cámara fotográfica). Estos equipos operaron en forma continua y entregaron información valiosa, pero al cierre del proyecto de Línea Base, sólo permanecen en operación la AWS y el sensor de presión de agua. Considerando que el objetivo es poder contrastar este ambiente marítimo (fiordo Jorge Montt), con sectores más continentales, se propone ampliar la red de monitoreo existente a esta latitud, con una nueva área de trabajo en el margen oriental del CHS.

Esta primera prioridad está compuesta por lo tanto por la mantención y fortalecimiento de la red actual con algunas adiciones menores:

Transecta 1 (Jorge Montt-Oriental),

- Fiordo Jorge Montt, Glaciar Jorge Montt (48°15'18.07"S / 73°27'34.96"O, 200 m snm)
    - 1 AWS (mantener y actualizar la ya existente)
    - 1 Sensor de presión de agua (mantener y actualizar el ya existente)
    - 1 punto GPS para mediciones cortas (3-4 días)
    - Mediciones batimétricas
    - 1 Cámara fotográfica en sitio a definir
- Glaciar Oriental, (48°28’S / 73°2’O a 500 m snm).
    - 1 AWS
    - 1 Sensor de presión de agua en lago proglacial oriental
    - 1 punto GPS para mediciones cortas (3-4 días)
    - Mediciones batimétricas
    - 1 Cámara fotográfica

Transecta 2 (Témpano-O´Higgins),

- Fiordo Témpano, Glaciar Témpano (48°42'9.24"S/ 73°59'3.38"O, 10 m snm)
    - 1 AWS (mantener y actualizar la ya existente)
    - 1 Sensor de presión de agua (mantener el existente)
    - 1 punto GPS para mediciones cortas (3-4 días)
    - Mediciones batimétricas
    - 1 Cámara fotográfica en nuevo sitio a definir
- *Nunatak* Témpano, (48°49'57.11"S/ 73°43'28.21"O 1100 m snm).
    - 1 AWS (mantener y actualizar la ya existente)
    - 1 módulo de oficina/cocina de 18 m^2 (mantención del ya existente)
    - 1 módulo de alojamiento/baño de 12 m^2 (mantención del ya existente)
    - 1 punto GPS para mediciones continuas
- *Nunatak* Greve, (48°49'53.26"S / 73°34'58.13"O 1400 m snm).
    - 1 AWS (mantener y actualizar la ya existente)
    - 1 módulo de oficina/cocina de 18 m^2 (mantención del ya existente)
    - 1 módulo de alojamiento/baño de 12 m^2 (mantención del ya existente)
    - 4 garajes para guardar motos de nieve (mantención de los ya existentes)
    - 4 motos de nieve (volver a subir)
    - 1 punto GPS para mediciones continuas
- *Nunatak* Ohiggins, (48°55'21.50"S/ 73°16'21.75"O 1180 m snm).
    - 1 AWS (mantener y actualizar la ya existente)
    - 1 módulo de oficina/cocina de 18 m^2 (mantención del existente)
    - 1 módulo de alojamiento/baño de 12 m^2 (mantención del existente)
    - 1 punto GPS para mediciones continuas
- Glaciar O'Higgins, (48°55'44.56"S/ 73° 8'24.64"O 300 m snm)
    - 1 AWS (mantener y actualizar la ya existente)
    - 1 punto GPS para mediciones cortas (3-4 días)
    - 1 sensor de presión de agua en bahía Pirámide (48°55'57.72"S/ 73° 8'15.44"O, 250 m snm)
    - 1 Cámara fotográfica en sitio a definir

En esta transecta habría que realizar además nuevas mediciones LiDAR, radar y con sensores remotos para monitorear cambios y tener un análisis más completo de los cambios glaciológicos en curso. Se propone además generar mosaicos con fotografías aéreas asociadas a levantamientos LiDAR de las zonas cercanas a los frentes de los glaciares principales (Jorge Montt, Oriental, O'Higgins y Témpanos).

10.3.2 Proyecto prioridad 2

Se propone que además de realizarse las mantenciones y actualizaciones de la red anterior, se instale una nueva línea transversal de mediciones, siguiendo el mismo esquema empleado en este proyecto de Línea base, pero esta vez a la latitud del glaciar Pío XI. Con esta nueva transecta se tendría una cobertura completa de los cambios latitudinales y longitudinales de la parte norte del CHS. Esta nueva línea de mediciones tendría como bases de apoyo las localidades de Puerto Edén y Villa O'Higgins.

Transecta 3 (Glaciar Pío XI-Paso Marconi):

- Fiordo Eyre, Glaciar Pío (XI 49º13'S / 74º'02W, 50 m snm)
    - 1 AWS
    - 1 Cámara fotográfica
    - 1 Sensor de presión de agua
    - 1 punto GPS para mediciones cortas (3-4 días)
    - Mediciones batimétricas
- Paso Pío XI, (49º11'S / 73º23'O, 2100 m snm)
    - 1 AWS,
    - 1 módulo de oficina/cocina de 18 m^2
    - 1 módulo de alojamiento/baño de 12 m^2
    - 4 garajes para guardar motos de nieve
    - 1 punto GPS para mediciones continuas
- Gorra Blanca, (49º9'30''S / 73º08'20''O, 1600 m snm)
    - 1 AWS
    - 1 punto GPS para mediciones continuas

En esta transecta habría que realizar además mediciones LiDAR, Radar y con Sensores remotos para un análisis más completo de los cambios glaciológicos en curso. Se propone además generar mosaicos con fotografías aéreas asociadas a levantamientos LiDAR de las zonas cercanas a los frentes de los glaciares principales (Pío XI).

10.3.3 Proyecto prioridad 3

Se propone una tercera prioridad para nuevas instalaciones siguiendo el mismo esquema empleado en la actualidad, pero esta vez en la parte Sur del CHS, en particular entre los glaciares Amalia en el fiordo Peel y Tyndall en las Torres del Paine. Esta nueva línea de mediciones tendría como base de apoyo la localidad de Puerto Natales y las instalaciones del Parque Nacional Torres del Paine.

Transecta 4 (Glaciar Amalia-Glaciar Tyndall)

- Fiordo Peel, Glaciar Amalia (50°56'47.31"S / 73°41'21.99"O, 50 m snm)
    - 1 AWS
    - 1 Cámara fotográfica
    - 1 Sensor de presión de agua
    - 1 punto GPS para mediciones cortas (3-4 días)
    - Mediciones batimétricas
- Nunatak Tyndall, (51° 3'26.10"S / 73°28'39.91"O, 1300 m snm)
    - 1 AWS
    - 1 módulo de oficina/cocina de 18 m^2
    - 1 módulo de alojamiento/baño de 12 m^2
    - 1 punto GPS para mediciones continuas
- Glaciar Tyndall, (51°14'45.80"S/ 73°15'56.12"O, 120 m snm)
    - 1 AWS
    - 1 Cámara fotográfica
    - 1 Sensor de presión de agua
    - 1 punto GPS para mediciones cortas (3-4 días)
    - Mediciones batimétricas

En esta transecta habría que realizar además, mediciones LiDAR, Radar y con Sensores remotos para un análisis más completo de los cambios glaciológicos en curso. Se propone generar mosaicos con fotografías aéreas asociadas a levantamientos LiDAR de las zonas cercanas a los frentes de los glaciares principales (Amalia y Tyndall).

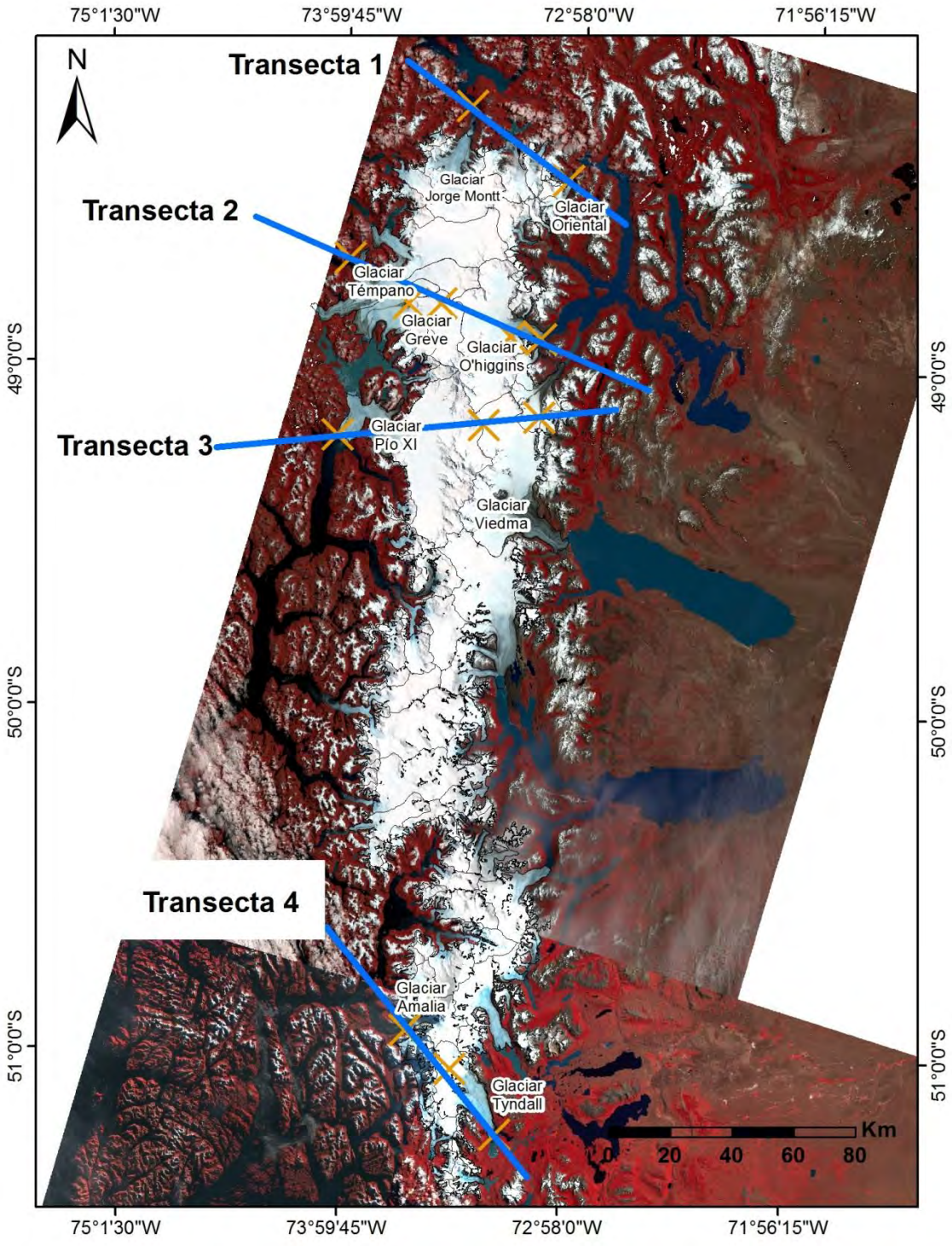


Figura 10.1 Localización de transectas propuestas recomendadas para el desarrollo de nuevos estudios en CHS.

11 Referencias

De Angelis, H. (2014), Hypsometry and sensitivity of the mass balance to changes in equilibrium-line altitude: the case of the Southern Patagonia Icefield, *J. Glaciol.*, *60*(219), 14–28.

Aniya, M., R. Naruse, M. Shizukuishi, P. Skvarca, and G. Casassa (1992), Monitoring recent glacier variations in the Southern Patagonia Icefield, utilizing remote sensing data, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens.*, *29*(b7), 87–94.

Aniya, M., H. Sato, R. Naruse, P. Skvarca, and G. Casassa (1996), The use of satellite and airborne imagery to inventory outlet glaciers of the Southern Patagonia Icefield, South America, *Photogramm. Eng. Remote Sensing*, *62*(12), 1361–1369.

Aniya, M., H. Sato, R. Naruse, P. Skvarca, and G. Casassa (1997), Recent glacier variations in the Southern Patagonia Icefield, South America, *Arctic, Antarct. Alp. Res.*, *29*(1), 1–12.

Annan, A. (2009), Ground penetrating radar (GPR) principles, in *Ground penetrating radar: theory and applications*, edited by Harris Jol, pp. 3–40, Elsevier Science, Amsterdam.

Aravena, J., and B. Luckman (2008), Spatio-temporal rainfall patterns in Southern South America, *Int. J. Climatol.*, *29*, 2106–2120.

Arcone, S., and A. Delaney (1984), Field dielectric measurements of frozen silt using VHF pulses, *Cold Reg. Sci. Technol.*, *9*(1), 29–37.

Arendt, A. et al. (2012), Randolph Glacier Inventory [v2.0]: A Dataset of Global Glacier Outlines. Global Land Ice Measurements from Space, Boulder Colorado, USA.

Aristarain, A., and R. Delmas (1993), Firn-core study from the Southern Patagonia Ice Cap, *J. Glaciol.*, *39*, 249–254.

Bamber, J., and A. Rivera (2007), A review of remote sensing methods for glacier mass balance determination, *Glob. Planet. Change*, *59*(1–4), 138–148.

Barcaza, G. (1999), Morfología glacial y proglacial de la zona del glaciar Dickson, Campo de Hielo Sur, *Rev. Geogr. Norte Gd.*, *26*, 15–21.

Benn, D., N. Hulton, and R. Mottram (2007), "Calving laws", "sliding laws" and the stability of tidewater glaciers, *Ann. Glaciol.*, *46*, 123–130.

Blindow, N., C. Salat, V. Gundelach, U. Buschmann, and W. Kahnt (2011), Performance and calibration of the helicopter GPR system BGR-P30, in *Proceedings of the 6th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR 2011)*, pp. 271–275, Aachen, Germany.

Bogorodsky, V., C. Bentley, and P. Gudmandsen (1985), *Radioglaciology*, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht.

Boyce, E. S., R. J. Motyka, and M. Truffer (2007), Flotation and retreat of a lake-calving terminus, Mendenhall Glacier, southeast Alaska, USA, *J. Glaciol.*, *53*(181), 211–224.

Brown, C. G., K. Sarabandi, and L. E. Pierce (2005), Validation of the Shuttle Radar Topography Mission height data, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, *43*(8), 1707–1715.

Casassa, G. (1992), Radio-echo sounding of Tyndall Glacier, Southern Patagonia, *Bull. Glacier Res.*, *10*, 69–74.

Casassa, G., H. Brecher, A. Rivera, and M. Aniya (1997), A century-long recession record of Glaciar O'Higgins, Chilean Patagonia, *Ann. Glaciol.*, *24*, 106–110.

Casassa, G. et al. (2007), Lago O'Higgins, Patagonia: Glacial Over Deepening and Glacier Retreat in a Freshwater Fjord, in *GEOSUR*, p. 27.

Casassa, G., J. L. Rodríguez, and T. Loriaux (2014), A new glacier inventory for the Southern Patagonia Icefield and areal changes 1986-2000, in *Global Land Ice Measurements from Space*, edited by J. Kargel, G. Leonard, M. Bishop, A. Kääb, and B. Raup, pp. 639–660, Springer-Praxis, Hamburg.

Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (2016), *Explorador CR2, explorador.cr2.cl*, Chile.

Corripio, J. (2004), Snow surface albedo estimation using terrestrial photography, *Int. J. Remote Sens.*, *25*(24), 5705–5729.

Cox, L., and R. March (2004), Comparison of geodetic and glaciological mass-balance techniques, Gulkana Glacier, Alaska, U.S.A., *J. Glaciol.*, *50*(170), 363–370.

Cuffey, K., and W. Paterson (2010), *The Physics of Glaciers*, 4th ed., Elsevier, Burlington, MA.

Davies, B., and N. Glasser (2012), Accelerating shrinkage of Patagonian glaciers from the "Little Ice Age" (c. 2 AD 1870) to 2011, *J. Glaciol.*, *58*(212), 1063–1084.

DGA (2011), *Variaciones recientes de glaciares en Chile, según principales zonas glaciológicas. Realizado por Centro de Estudios Científicos. S.I.T.261*, Santiago, Chile.

DGA (2012), *Variaciones recientes de glaciares en respuesta al cambio climático: caracteristicas glaciológicas de los glaciares San Rafael, Nef y Colonia, Campo de Hielo Norte. Realizado por Centro de Estudios Cientificos para la Dirección General de Aguas. S.I.T.302*, Santiago, Chile.

DGA (2015), *Atlas del Agua Chile 2016 S.E.B. 6*, Santiago, Chile.

Dowdeswell, J.A. Dowdeswell, E. K. R. E. A. (2014), Assemblage of glacial and related landforms in the fjords of southern Chile, *Atlas Submar. Glacial Landforms Mod. Quat. Anc.*, 1–4.

Dussaillant, A., G. Benito, W. Buytaert, P. Carling, C. Meier, and F. Espinoza (2010), Repeated glacial-lake outburst floods in Patagonia: an increasing hazard?, *Nat. Hazards*, *59*, 469–481.

Dussaillant, A., W. Buytaert, & C. M., and F. Espinoza (2015), Hydrological regime of remote catchments with extreme gradients under accelerated change: the Baker basin in Patagonia, *Hydrol. Sci. J.*, doi:doi=10.1080/02626667.2012.726993.

Eijpen, K., C. Warren, and D. Benn (2003), Subaqueous melt rates at calving termini: a laboratory approach, *Ann. Glaciol.*, *36*, 179–183.

Elnima, E. E. (2015), A solution for exterior and relative orientation in photogrammetry, a genetic evolution approach, *J. King Saud Univ. - Eng. Sci.*, *27*(1), 108–113, doi:10.1016/j.jksues.2013.05.004.

Enomoto, H., and Y. Abe (1983), No Titleeconnaissance studies of meteor- ology and glaciology in Steffen and Jorge Montt glaciers, Patagonia, in *Glaciological and meteorological studies in Patagonia, Chile, by Japanese research expeditions in 1967–1982 .*, pp. 11–14.

Escobar, F., Vidal, F., Garin, C., and Naruse, R. (1992), Water balance in

the Patagonia Icefield, *Glaciol. Res. Patagon. 1990, Ed. by Naruse, R. Aniya, M., Nagoya Japanese Soc. Snow Ice*, 109–119.

Evans, S. (1965), Dielectric properties of ice and snow - A review, *J. Glaciol.*, *5*(42), 773–792.

Falvey, M., and R. Garreaud (2009), Regional cooling in a warming world: Recent temperature trends in the southeast Pacific and along the west coast of subtropical South America (1979–2006), *J. Geophys. Res.*, *114*(D4), 1–16.

Gacitúa, G., J. a. Uribe, R. Wilson, T. Loriaux, J. Hernández, and A. Rivera (2015), 50 MHz helicopter-borne radar data for determination of glacier thermal regime in the central Chilean Andes, *Ann. Glaciol.*, *56*(70), 193–201.

Gardner A., Moholdt G., Cogley J., Wouters B., Arendt A., Wahr J., Berthier E., Hock R., Pfeffer W., Kaser G., Ligtenberg S., Bolch T., Sharp M., Hagen J., van den B. M. & F. P. (2013), Reconciled estimate of glacier contributions to sea level rise: 2003 to 2009., *Science (80-.).*, *340*(6134), 852–857.

Garreaud, R., P. Lopez, M. Minvielle, and M. Rojas (2013), Large-Scale Control on the Patagonian Climate, *J. Clim.*, *26*(1), 215–230.

Garreaud, R., G. Nicora, R. Burhesser, and E. Ávila (2014), Lighting in Western Patagonia, *J. Geophys. Res. Atmos.*, *119*, 1–15.

Giles, A. B., R. A. Massom, and R. C. Warner (2009), Remote Sensing of Environment A method for sub-pixel scale feature-tracking using Radarsat images applied to the Mertz Glacier Tongue , East Antarctica, *Remote Sens. Environ.*, *113*(8), 1691–1699, doi:10.1016/j.rse.2009.03.015.

Gillett, N. P., T. D. Kell, and P. D. Jones (2006), Regional climate impacts of the Southern Annular Mode, *Geophys. Res. Lett.*, *33*(23), L23704.

Glasser, N., and K. Jansson (2013), The glacialmap of Southern South America, *J. Maps*, *4*(1), 175–196.

Glen, J., and J. Paren (1975), The electrical properties of snow and ice, *J. Glaciol.*, *15*(73), 15–38.

Gourlet, P., E. Rignot, A. Rivera, and G. Casassa (2016), Ice thickness of the northern half of the Patagonia Icefields of South America from high-resolution airborne gravity surveys, *Geophys. Res. Lett.*, 1–9.

Hall, A., and M. Visbeck (2002), Synchronous Variability in the Southern Hemisphere Atmosphere , Sea Ice , and Ocean Resulting from the Annular Mode, *J. Clim.*, *15*, 3043–3057.

Haresign, E., and C. R. Warren (2005), Melt rates at calving termini: a study at Glaciar Leon, Chilean Patagonia, *Geol. Soc. London, Spec. Publ.*, *242*, 99–109, doi:10.1144/GSL.SP.2005.242.01.09.

Heid, T., and A. Kääb (2012), Evaluation of existing image matching methods for deriving glacier surface displacements globally from optical satellite imagery, *Remote Sens. Environ.*, *118*, 339–355.

Herve, F., M. Calderón, and V. Faundez (2008), The metamorphic complexes of the Patagonian and Fuegian Andes, *Geol. Acta*, *6*(1), 43–53.

Hervé, F., R. Pankhurst, C. Fanning, M. Calderón, and G. Yaxley (2007), The South Patagonian batholith: 150 my of granite magmatism on a plate margin, *Lithos*, *97*, 373–394.

Hock, R. (2003), Temperature index melt modelling in mountain areas, *J. Hydrol.*, *282*(1–4), 104–115.

Huss, M., and D. Farinotti (2012), Distributed ice thickness and volume of all glaciers around the globe, *J. Geophys. Res.*, *117*(F4), F04010.

Instituto de Meteorología de Holanda (2016), *KNMI Climate Explorer, https://climexp.knmi.nl/start.cgi?id=someone@somewhere*, Holanda.

Jacques-Coper, M., and R. D. Garreaud (2015), Characterization of the 1970s climate shift in South America, *Int. J. Climatol.*, *35*(8), 2164–2179.

Jo, T., and W. H. K. M. Schmeits (1998), Modelling the response of glaciers to climate warming, *Clim. Dyn.*, *14*, 267–274.

Kääb, A. (2002), Monitoring high-mountain terrain deformation from digital aerial imagery and ASTER data, *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, *57*(1–2), 39–52.

Kalnay, E. et al. (1996), The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, *77*(3), 437–471.

Kaser, G., I. Juen, C. Georges, J. Gómez, and W. Tamayo (2003), The impact of glaciers on the runoff and the reconstruction of mass balance history from hydrological data in the tropical Cordillera Blanca, Per, *J. Hydrol.*, *282*(1–4), 130–144.

Koppes, M., R. Sylwester, A. Rivera, and B. Hallet (2010), Variations in sediment yield over the advance and retreat of a calving glacier, Laguna San Rafael, North Patagonian Icefield, *Quat. Res.*, *73*, 84–95.

Koppes, M., B. Hallet, E. Rignot, J. Mouginot, J. Smith, and K. Boldt (2015), Observed latitudinal variations in erosion as a function of glacier dynamics, *Nature*, *526*, 100–103.

De la Cruz, R., D. Welkner, M. Suárez, and D. Quiroz (2004), *Geología del área oriental de las Hojas Cochrane y Villa O'Higgins, Región Aisén del General Carlos Ibáñez del Campo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geológica Básica, No. 85, 52 p., 1 mapa escala 1:250.000.*, Santiago, Chile.

Lange, H., G. Casassa, E. Ivins, L. Schroeder, M. Fritsche, A. Richter, A. Groh, and R. Dietrich (2014), Observed crustal uplift near the Southern Patagonian Icefield constrains improved viscoelastic Earth models, *Geophys. Res. Lett.*, doi:10.1002/2013GL058419.

Lliboutry, L. (1956), *Nieves y glaciares de Chile: fundamentos de glaciología*, Ediciones de la Universidad de Chile.

Maas, H., E. Schwalbe, G. Casassa, and A. Wendt (2010), Photogrammetric Determination Of Spatio-Temporal Velocity Fields At Glaciar San Rafael In The Northern Patagonian Icefield, in *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVIII, Part 5. Commission V Symposium*, Newcastle, UK.

Maas, H.-G., G. Casassa, D. Schneider, E. Schwalbe, and A. Wendt (2013), Photogrammetric techniques for the determination of spatio-temporal velocity fields at Glaciar San Rafael, Chile, *Photogrametric Eng. Remote Sens.*, *79*(3), 299–306.

Marshall, G. (2003), Trends in the Southern Annular Mode from Observations and Reanalyses, *J. Clim.*, *16*, 4134–4143.

Moffat, C. (2014), Wind-driven modulation of warm water supply to a proglacial fjord, Jorge Montt Glacier, Patagonia, *Geophys. Res. Lett.*, 1–24.

Motyka, R., W. Dryer, J. Amundson, M. Truffer, and M. Fahnestock (2013), Rapid submarine melting driven by subglacial discharge, LeConte Glacier, Alaska, *Geophys. Res. Lett.*, *40*, 5153–5158.

Mouginot, J., and E. Rignot (2015), Ice motion of the Patagonian Icefields of South America: 1984-2014, *Geophys. Res. Lett.*

Muto, M., and M. Furuya (2013), Surface velocities and ice-front positions of eight major glaciers in the Southern Patagonian Ice Field, South America, from 2002 to 2011., *Remote Sens. Environ.*, *139*, 50–59.

O'Neel, S. O., K. A. Echelmeyer, and R. J. Motyka (2003), Short-term variations in calving of a tidewater glacier, *J. Glaciol.*, *49*(167), 587–598.

Oberreuter, J., J. Uribe, R. Zamora, G. Gacitúa, and A. Rivera (2014), Mediciones de espesor de hielo en Chile usando radio-echo sondaje, *Geoacta*, *39*(1), 108–122.

Oerlemans, J. et al. (1998), Modelling the response of glaciers to climate warming., *Clim. Dyn.*, *14*, 267–274.

Pankhurst, R., T. Riley, C. Fanning, and S. Kelley (2000), Episodic silicic volcanism in Patagonia and the Antarctic Peninsula: chronology of magmatism associated with the breakup of Gondwana, *J. Petrol.*, *41*, 603–625.

Paul, F. et al. (2013), On the accuracy of glacier outlines derived from remote-sensing data, *Ann. Glaciol.*, *54*(63), 171–182,

doi:10.3189/2013AoG63A296.

Pellikka, P., and W. G. Rees (2010), *Remote sensing of glaciers: techniques for topographic, spatial, and thematic mapping of glaciers*, CRC Press.

Pelto, M. S., and C. R. Warren (1991), Relationship between tidewater glacier calving velocity and water depth at the calving front, *Ann. Glaciol.*, *15*, 115–118.

Plewes, A., and B. Hubbard (2001), A review of the use of radio-echo sounding in glaciology, *Prog. Phys. Geogr.*, *25*(2), 203–236.

Post, A., S. O'Neel, and R. J. Motyka (2011), A Complex Relationship Between Calving Glaciers and Climate, *Eos (Washington. DC).*, *92*(37), 305–312.

Rasmussen, L. a., H. Conway, and C. F. Raymond (2007), Influence of upper air conditions on the Patagonia icefields, *Glob. Planet. Change*, *59*(1–4), 203–216.

Raymond, C., T. A. Neumann, E. Rignot, K. Echelmeyer, and G. Casassa (2005a), Retreat of Glaciar Tyndall , Patagonia , over the last half-century, *J. Glaciol.*, *51*(173), 239–247.

Raymond, C., T. Neumann, E. Rignot, K. Echelmeyer, A. Rivera, and G. Casassa (2005b), Retreat of Tyndall Glacier, Patagonia, over the last half century, *J. Glaciol.*, *51*(173), 239–247.

Rignot, E., A. Rivera, and G. Casassa (2003), Contribution of the Patagonia Icefields of South America to sea level rise., *Science*, *302*(5644), 434–7.

Rignot, E., M. Koppes, and I. Velicogna (2010), Rapid submarine

melting of the calving faces of West Greenland glaciers, *Nat. Geosci.*, *3*, 187−191.

Rignot, E., I. Fenty, Y. Xu, C. Cai, I. Velicogna, C. Cofaigh, J. Dowdeswell, W. Weinrebe, G. Catania, and D. Duncan (2016), Bathymetry data reveal glaciers vulnerable to ice-ocean interaction in Uummannaq and Vaigat glacial fjords, west Greenland, *Geophys. Res. Lett.*, doi:10.1002/2016GL067832.

Rivera, A. (2004), Mass balance investigations at Glaciar Chico , Southern Patagonia Icefield, Chile.

Rivera, A., and G. Casassa (1999), Volume changes on Pio XI glacier, Patagonia: 1975 − 1995, *Glob. Planet. Change*, *22*, 233−244.

Rivera, A., and G. Casassa (2002), Ice Thickness Measurements on the Southern Patagonian Icefield, in *The Patagonian Icefields. A unique natural laboratory for environmental and climate change studies.*, Kluwer Academic/Plenum Publishers.

Rivera, A., and G. Casassa (2004), Ice Elevation, Areal, and Frontal Changes of Glaciers from National Park Torres del Paine, Southern Patagonia Icefield, *Arctic, Antarct. Alp. Res.*, *36*(4), 379−389.

Rivera, A., J. C. Aravena, and G. Casassa (1997), Recent fluctuations of Glacier Pio XI, Patagonia: Dicussion of a glacial surge hyphotesis, *Mt. Res. Dev.*, *17*(4), 309−322.

Rivera, A., G. Casassa, J. Bamber, and A. Ka (2005), Ice-elevation changes of Glaciar Chico, southern Patagonia, using ASTER DEMs, aerial photographs and GPS data, *J. Glaciol.*, *51*(172), 105−112.

Rivera, A., J. Corripio, C. Bravo, and S. Cisternas (2012a), Glaciar Jorge Montt (Chilean Patagonia) dynamics derived from photos obtained

by fixed cameras and satellite image feature tracking, *Ann. Glaciol.*, *53*(60), 147–155.

Rivera, A., M. Koppes, C. Bravo, and J. Aravena (2012b), Little Ice Age advance and retreat of Glaciar Jorge Montt, Chilean Patagonia, *Clim. Past*, *8*, 403–414.

Rivera, A., R. Zamora, J. Uribe, A. Wendt, J. Oberreuter, S. Cisternas, F. Gimeno, and J. Clavero (2014), Recent changes in total ice volume on Volcán Villarrica, Southern Chile, *Nat. Hazards*, *75*(1), 33–55.

Rivera, A., F. Bown, F. Napoleoni, C. Muñoz, and M. Vuille (2016), *Balance de Masa Glaciar*, Ediciones., edited by CECs, Valdivia, Chile.

Rott, H., M. Stuefer, A. Siegel, P. Skvarca, and A. Eckstaller (2007), Mass fluxes and dynamics of Moreno Glacier, Southern Patagonia Icefield, *Geophys. Res. Lett.*, *25*(9), 1407–1410.

Sagredo, E. a., and T. V. Lowell (2012), Climatology of Andean glaciers: A framework to understand glacier response to climate change, *Glob. Planet. Change*, *86–87*, 101–109.

Sakakibara, D., and S. Sugiyama (2014), Ice-front variations and speed changes of calving glaciers in the Southern Patagonia Icefield from 1984 to 2011, *J. Geophys. Res.*, DOI: 10.1002/2014JF003148.

Schaefer, M., H. Machguth, M. Falvey, G. Casassa, and E. Rignot (2015), Quantifying mass balance processes on the Southern Patagonia Icefield, *Cryosph.*, *9*(1), 25–35.

Schneider, D., and H. Maas (2004), COMBINED BUNDLE ADJUSTMENT OF PANORAMIC AND CENTRAL PERSPECTIVE IMAGES,

Schwikowski, M., S. Brütsch, G. Casassa, and A. Rivera (2006), A

potential high-elevation ice-core site at Hielo Patagónico Sur, *Ann. Glaciol.*, *43*, 8–13.

Schwikowski, M., M. Schläppi, P. Santibañez, A. Rivera, and G. Casassa (2013), Net accumulation rates derived from ice core stable isotope records of Pío XI glacier, Southern Patagonia Icefield, *Cryosph.*, *6*, 5291–5316.

Seeber, G. (1993), *Satellite Geodesy, Foundations, Methods, and Applications*, Berlin, Germany.

SERNAGEOMIN (2003), *Mapa Geológico de Chile: versión digital. Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Digital, No. 4 (CD-ROM, versión1.0, 2003)*, Santiago, Chile.

Shiraiwa, T., S. Kohshima, R. Uemura, N. Yoshida, S. Matoba, J. Uetake, and M. Godoi (2002), High net accumulation rates at Campo de Hielo Payagónico Sur, South America, revealed by analysis of a 45.97 m long ice core, *Ann. Glaciol.*, *35*, 84–90.

Skvarca, P., and R. Naruse (1996), Dynamic behavior of Glaciar Perito Moreno, Southern Patagonia., *Ann. Glaciol.*, *24*, 268–271.

Skvarca, P. ., H. . De Angelis, R. . Naruse, C. R. . Warren, and M. Aniya (2002), Calving rates in fresh water: new data from southern Patagonia, *Ann. Glaciol.*, *34*, 379–384.

Smith, R. B., and J. P. Evans (2007), Orographic Precipitation and Water Vapor Fractionation over the Southern Andes, *J. Hydrometeorol.*, *8*(1), 3–19.

Spikes, V., G. Hamilton, S. Arcone, S. Kaspari, and P. Mayewski (2004), Variability in Accumulation Rates from GPR Profiling on the West Antarctic Plateau, *Ann. Glaciol.*, *39*, 238–244.

Sugiyama, S., P. Skvarca, N. Naito, H. Enomoto, S. Tsutaki, K. Tone, S. Marinsek, and M. Aniya (2011), Ice speed of a calving glacier modulated by small fluctuations in basal water pressure, *Nat. Geosci.*, *4*, 597−600.

University of East Anglia (2016), *Climatic Research Unit, cru.uea.ac.uk*, Reino Unido.

Villalba, R., A. Lara, J. A. Boninsegna, M. Masiokas, S. Delgado, J. C. Aravena, F. A. Roig, A. Schmelter, A. Wolodarsky, and A. Ripalta (2003), Large.scale temperature changes across the Southern Andes: 20th-century variations in the context of the past 400 years, *Clim. Change*, *59*, 177−232.

Warren, C., and M. Aniya (1999), The calving glaciers of southern South America, *Glob. Planet. Change*, *22*, 59−77.

Warren, C., and M. Kirkbride (2003), Calving speed and climatic sensitivity of New Zealand lake-calving glaciers, *Ann. Glaciol.*, *36*(1), 173−178.

Warren, C., D. Benn, V. Winchester, and S. Harrison (2001), Buoyancy-driven lacustrine calving, Glaciar Nef, Chilean Patagonia, *J. Glaciol.*, *47*(156), 135−146.

Warren, C. R., debbie R. Greene, and N. F. Glasser (1995), Glaciar Upsala, Patagonia: rapid calving retreat in fresh water, *Ann. Glaciol.*, *21*, 311−316.

Watts, R., and A. England (1976), Radio-echo sounding of temperate glaciers: ice properties and sounder design criteria, *J. Glaciol.*, *17*(75), 39−48.

Willis, M. J., A. K. Melkonian, M. E. Pritchard, and A. Rivera (2012), Ice

loss from the Southern Patagonian Ice Field, South America, between 2000 and 2012, *Geophys. Res. Lett.*, doi:10.1029/2012GL053136.

Wilson, R., D. Carrión, and A. Rivera (2016), Detailed dynamic, geometric and supraglacial moraine data for Glaciar Pio XI, the only surge-type glacier of the Southern Patagonia Icefield., *Ann. Glaciol.*, doi:10.1017/aog.2016.32.

Zamora, R., D. Ulloa, G. Garcia, R. Mella, J. Uribe, J. Wendt, A. Rivera, G. Gacitúa, and G. Casassa (2009), Airborne radar sounder for temperate ice: initial results from Patagonia, *J. Glaciol.*, *55*(191), 507–512.

Zemp, M. et al. (2013), Reanalysing glacier mass balance measurement series, *Cryosphere*, *7*(4), 1227–1245, doi:10.5194/tc-7-1227-2013.

Zumberge, J. F., M. B. Heflin, D. C. Jefferson, M. M. Watkins, and F. H. Webb (1997), Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, *102*(B3), 5005–5017.

Anexo A *Equipo de Trabajo*

PhD. **Andrés Rivera**, Glaciólogo, Director del proyecto

Ing. **Rodrigo Zamora**, Director operativo

MSc. **Claudio Bravo**, Meteorología y climatología

MSc. **Francisca Bown**, Glaciología

MSc. **Sebastián Cisternas**, Instrumentación y programación

MSc. **Thomas Loriaux**, Glaciología

MSc. **Jonathan Oberrreuter**, Análisis de datos

MSc. **Sebastián Pulgar**, Análisis de datos e instrumentación

PhD. **Tobías Kohoutek**, Geodesia

PhD. **Ryan Wilson**, Glaciología

Ing. **José Andrés Uribe**, Radar y diseño electrónico

Ing. **Marco Gaete**, Análisis datos de radar

Ing. **Gloria Galindo**, Base de datos

Geog. **Felipe Napoleoni**, Sensores remotos y análisis de datos.

Geog. **Daniela Carrión,** Sensores remotos

Geol. **Jorge Correa**, Geología

Ing. (e) **Jorge Hernández**, Geodesia (GPS y LiDAR)

Ing. (e) **Cristian Inostroza**, Geodesia (GPS y LiDAR)

Ing. (e) **Alejandro Silva**, Instrumentación

Ing. (e) **Jonathan Garcés**, Instrumentación

Lic. **María Gacitúa**, Sistemas de información geográfica

MBA. **Felipe Amtmann**, gestión de proyecto

Sr. **Fernando Basilio**, Arquitecto, módulos e infraestructura

Sr. **Carlos Fouilloux**, Logística

Sr. **Francisco de Miguel**, Logística

Sr. **Tim Hewitt**, Seguridad y guía de montaña

Sra. **Claudia Flores**, Secretaria y administración

Anexo B *Bitácoras de Terreno*

B.1 Campaña realizada entre 27/04/14 y 13/05/14

Tabla Anexo B.1 Bitácora de cuarta campaña de terreno del proyecto.

Mes	Día	Actividad
Abril	27	Traslado Valdivia – Balmaceda - Cochrane del personal y la carga.
	28	Arribo a Tortel y preparación de la carga.
	29	Vuelo a sector AWS Jorge Montt e identificación de sitio de instalación.
	30	Cableado AWS y sensores de presión de agua en Tortel.
Mayo	1	Vuelo al glaciar Jorge Montt e inicio de instalación de cámara y AWS.
	2	Repliegue a Tortel y definición de sitio sensor de presión glaciar Jorge Montt.
	3	Condiciones meteorológicas impiden la realización de actividades.
	4	Condiciones meteorológicas impiden la realización de actividades.
	5	Condiciones meteorológicas impiden la realización de actividades.
	6	Instalación de cámara en glaciar O'Higgins y sensor de presión en glaciar Jorge Montt y exploración aérea.
	7	Instalación de cámara y sensor presión en glaciar Témpano y exploración aérea.
	8	Condiciones meteorológicas impiden la realización de actividades.
	9	Trabajos cámara y AWS en glaciar Jorge Montt.
	10	Conexión y puesta en operación AWS en glaciar Jorge Montt.
	11	Traslado Tortel - Coyhaique.
	13	Traslado del personal Balmaceda – Valdivia.

B.2 Campaña realizada entre 14/09/14 y 19/10/14

Tabla Anexo B.2 Bitácora de cuarta campaña de terreno del proyecto.

Mes	Día	Actividad
Septiembre	14	Arribo a Caleta Tortel personal logístico/guía CECs e inicio de recepción de carga, equipos y motos en aeródromo.
	23	Arribo de los módulos a Caleta Tortel.
	24	Arribo del personal CECs.
	25	Inicio de preparación de las cargas en aeródromo de Caleta Tortel. Mantención cámara fotográfica en Glaciar Jorge Montt.
	27	Vuelo de reconocimiento con personal de la DGA y mantención estación AWS zona baja en Glaciar Jorge Montt.
	28	Vuelo de reconocimiento con personal de la DGA.
	29	Primer vuelo e instalación de campamento base, búsqueda de base rocosa para módulos.
	30	Segundo vuelo con personal, búsqueda de base rocosa para módulos e inicio de instalación de módulo 4x3 m^2.
Octubre	01	Inicio de instalación de módulo 4x3 m^2, búsqueda de base rocosa para módulo 6x3 m^2.
	02	Instalación de módulo 4x3 m^2, traslado torre de estacione AWS a campamento base, búsqueda de base rocosa para módulo 6x3 m^2.
	03	Finalización de la instalación módulo 4x3 m^2, inicio instalación AWS y reconocimiento con motos al sector alto del glaciar O'Higgins.
	04	Instalación base módulo 6x3 m^2, instalación AWS, mediciones con GPR desde campamento base a baliza 4.
	05	Malas condiciones meteorológicas. Fuertes vientos. Precipitación de nieve constante y densa. Baja sensación térmica y escasas visibilidad producto del viento blanco (entre 3 m y 5 m).
	06	Malas condiciones meteorológicas. Fuertes vientos. Precipitación de nieve constante y densa. Baja sensación térmica y escasas visibilidad producto del viento blanco (entre 3 m y 5 m).
	07	Mal tiempo, descarga datos AWS y revisión grietas con GPR sector campamento.
	08	Mal tiempo. Mantención AWS y sensor de presión de agua en Glaciar O'Higgins y mantención del sensor de presión de agua en el Glaciar Jorge Montt.
	09	Malas condiciones meteorológicas. Fuertes vientos. Precipitación de nieve constante y densa. Baja sensación térmica y escasas visibilidad producto del viento blanco (entre 3 m y 5 m).
	10	Mal tiempo, viento blanco, escasa visibilidad y se cubren dos de las seis carpas personales.
	11	Mal tiempo, viento blanco y escasa visibilidad.
	12	Mal tiempo, escasa visibilidad, se desentierran las dos carpas y se instalan en una nueva ubicación y se reubican las cuatro restantes para evitar que se cubran de nieve.
	13	Mal tiempo, viento blanco y escasa visibilidad.
	14	Condiciones meteorológicas marginales, inicio instalación modulo principal, mantención y reparación sensores estación AWS y cambio de antena trasmisora ya que se destruyeron elementos debido al viento. Se desinstala carpa científica. Se guardan dos motos en sus respectivas cajas con sus repuestos (aceite, correas de distribución, etc.). Instalación de pluviómetro y finalización de mantención en estación AWS zona baja del Glaciar Jorge Montt.
	15	Condiciones meteorológicas marginales, nevando, se continua con instalación del módulo principal. Descarga datos AWS y medición manual SR50.
	16	Malas condiciones meteorológicas. Fuertes vientos. Precipitación de nieve constante y densa. Baja sensación térmica y escasas visibilidad producto del viento blanco (entre 3 m y 5 m).

	17	Malas condiciones meteorológicas. Fuertes vientos. Precipitación de nieve constante y densa. Baja sensación térmica y escasas visibilidad producto del viento blanco (entre 3 m y 5 m).
	18	Se inicia la desinstalación del campamento (carpas individuales, carpa cocina/comedor. Se guardan las dos motos restantes en sus respectivas cajas. Se realiza el descenso a Caleta Tortel en tres vuelos de helicóptero, dos con personal y uno de carga.
	19	Se realizan tres vuelos de helicóptero, el primer vuelo es de mantención a la estación fotográfica y meteorológica en el Glaciar Témpano. Se realiza un vuelo de inspección a la zona de acumulación del glaciar O'Higgins con el objetivo de revisar posibles *nunataks* para la instalación de la segunda estación glaciológica.

B.3 Campaña realizada entre 03/04/15 y 07/05/15

Tabla Anexo B.3 Bitácora de cuarta campaña de terreno del proyecto.

Mes	Día	Actividad
Abril	**3**	Traslado de personal CECs (4) desde Valdivia hacia Coyhaique. Coordinación de traslados y compras.
	4	Compras de alimento fresco, retiro y orden de equipo delicado desde empresa de transporte de carga aérea.
	5	Traslado de personal CECs (2) hacia Puerto Río Tranquilo, quedando los 2 restantes en Coyhaique asegurando los últimos detalles logísticos.
	6	Traslado personal CECs (2) desde Puerto Río Tranquilo hacia Caleta Tortel.
	7	Arribo a Balmaceda del resto de los profesionales del CECs (3) y traslado hacia Puerto Río Tranquilo (3+2).
	8	Traslado de personal CECS (5) desde Puerto Rio Tranquilo hacia a Caleta Tortel. Primera reunión de todo el equipo CECs (7) en Caleta Tortel. Arribo de helicóptero a Caleta Tortel.
	9	Arribo de los 2 módulos habitacionales de la 2da Estación Glaciológica e inicio de recepción del resto de la carga y equipos en aeródromo Caleta Tortel.
	10	Inicio de preparación de las cargas aéreas en aeródromo de Caleta Tortel. Primer vuelo de la campaña a la zona de periferia. Revisión y mantención cámara fotográfica, AWS y sensor presión de agua en Glaciar Jorge Montt. Arribo de personal de Ejército (2) a Caleta Tortel. Permanente monitoreo de condiciones meteorológicas y de seguridad.
	11	Primer vuelo en helicóptero a la zona de meseta: personal CECs y del Ejército a la Estación Glaciológica Nº1 Greve. Revisión de seguridad de los alrededores de la estación, orden interior de módulos.
	12	Desfavorables condiciones meteorológicas en Tortel y meseta. Imposibilidad de realizar vuelos. Mantención de módulo de 18 m^2 y 12 m^2 en Estación Glaciológica Greve.

	13	Malas condiciones meteorológicas. Precipitación de nieve y lluvia constante. Mantención de módulo 12 m^2 en Estación Glaciológica Greve (refuerzo del sellado interior), inventarios.
	14	Malas condiciones meteorológicas. Precipitación de nieve y lluvia constante en Tortel y meseta. Mantención de módulo de 18 m2 en Estación Glaciológica Greve (refuerzo del piso y verificación del sellado interior).
	15	Condiciones permiten un vuelo de traslado del personal desde nunatak Greve a nunatak Témpano. Montaje campamento. Transporte de módulos y carga a nunatak Témpano. Se realizan 7 vuelos en el día.
	16	Se realizan tres vuelos con cargas a nunatak Témpano, durante el último empeoran las condiciones de operación. Nivelación del basamento y ensamblaje de bases de módulo 12 m^2. Se inicia un período de aislamiento por imposibilidad de vuelos debido a meteorología hasta el día 26 de abril.
	17	Inicio de instalación de módulo 12 m^2: montaje y fijación del módulo con pernos de expansión, nivelación de las bases del módulo. Malas condiciones meteorológicas. Fuertes vientos, baja sensación térmica y tormenta de nieve que hacen muy difícil las tareas de terreno. En Tortel con viento e intensa lluvia.
	18	Instalación de módulo 12 m^2: fijación de gajos, frentes y puertas del módulo. Traslado AWS y búsqueda de base rocosa para módulo 6x3 m^2. Malas condiciones meteorológicas. Fuertes vientos, baja sensación térmica. En Tortel con viento e intensa lluvia.
	19	Finalización de la instalación módulo 12 m^2, selección de sitio para instalación AWS. Mal tiempo.
	20	Malas condiciones meteorológicas. Fuertes vientos. Precipitación de lluvia. Instalación de sistema eléctrico y orden del módulo 12 m^2. Resguardo de carga frágil.
	21	Disposición de las bases del módulo 18 m^2. Nivelación y perforación del basamento. Cableado de paneles solares. Malas condiciones meteorológicas.
	22	Cableado de sensores de AWS. Malas condiciones meteorológicas. Precipitación de agua constante. Escasa visibilidad producto de las nubes. En Tortel con viento e intensa lluvia.
	23	Cableado de sensores restantes de AWS. Orden y ensamblaje de muebles en módulo 12 m^2. Malas Condiciones meteorológicas. Fuertes vientos, lluvia constante y baja sensación térmica. En Tortel con intensa lluvia y baja visibilidad. Equipo continúa pernoctando en carpas.
	24	Nivelación de basamento, disposición de bases del módulo y perforación para instalación de bases del módulo de 18 m^2. Malas Condiciones meteorológicas. Fuertes vientos, lluvia constante y baja sensación térmica.
	25	Malas Condiciones meteorológicas. Fuertes vientos, lluvia constante y baja sensación térmica.

	26	Las condiciones meteorológicas permiten la realización de un vuelo en la zona de periferia para la revisión y mantención cámara fotográfica, AWS y sensor presión de agua en Glaciar O'Higgins. En tanto en meseta Témpano, el equipo -aún aislado- realiza la nivelación y fijación de bases de módulo de 18 m^2, instalación de secciones laterales del módulo de 18 m^2, sellado de ambos módulos (interior y exterior). Se levanta el campamento y se realiza el traslado del personal a los módulos habitacionales. Se logra realizar un vuelo desde el Glaciar O'Higgins al *nunatak* Témpano. Retorno a Tortel de personal Ejercito, Arribo a Estación Glaciológica Tempano del cuarto integrante del personal CECs, quedando 4 personas hasta el término de la campaña. No será posible volar (dadas las condiciones meteorológicas) sino hasta el 05 de mayo.
	27	Revisión y mantención cámara fotográfica, AWS y sensor presión de agua en Glaciar Tempano. Movimiento de estructura de más de 200kg de AWS hacia zona de instalación, nivelación y perforación de base para AWS. Orden de módulos, Instalación de tensores para módulo de 12 m^2. Malas condiciones en la meseta por lo que no es posible trasladar a dos personas desde el *nunatak* Témpano a Greve para realizar mantención programada de la AWS.
	28	Trabajo de sellado en módulo de 18 m^2 y de aislación de módulo de 12 m^2. Instalación de paneles solares. Intento de instalación de AWS.
	29	Cableado de estructura de AWS de respaldo. Trabajo de sellado en módulo de 12 m^2. Instalación de tensores para módulo de 18 m^2.
	30	Inventario de alimentos y herramientas disponibles en Estación Glaciológica Tempano. Disposición de carga para el traslado en helicóptero al momento de la evacuación. Mal tiempo, intensas nevazones en la meseta.
Mayo	1	Trabajo de aseguramiento de estructura de AWS y protección de esta. Inventario de material de mantención para módulos. Escasa visibilidad. Precipitación de nieve
	2	Instalación de AWS de respaldo. Se cambian los sensores de AWS principal a AWS de respaldo (Anemómetro y Pagoda Aspirada). Fijación de cajas *pelican* con baterías para AWS principal y de respaldo. Escasa visibilidad y precipitaciones de nieve.
	3	Perforación e instalación de coplas metálicas para conexión de cables de los paneles solares. Mal tiempo, precipitación intensa de nieve.
	4	Instalación de paneles solares para AWS de respaldo. Se instalaron 4 paneles y se acoplaron 2 paneles por cable. Conexión de sensores a *datalogger* de AWS de respaldo. Malas condiciones meteorológicas, baja sensación térmica. Condiciones de trabajo particularmente difíciles.
	5	Orden de módulos. Instalación de cámara fotográfica hacia glaciar Tempano. Evacuación del personal CECs y basura hacia Caleta Tortel. Visita deinspección en terreno de Directora DGA-XI, SEREMI-XI MOP, CONAF-XI y Gobernador Capitán Prat. Reunión en alcaldía organizada por DGA-XI. Término de operaciones.
	6	Traslado de personal CECs hacia Coyhaique.
	7	Retorno personal CECS a Valdivia luego de 35 días de de campaña.

B.4 Campaña realizada entre 02/09/15 y 29/10/15

Tabla Anexo B.4 Bitácora de cuarta campaña de terreno del proyecto.

Mes	Día	Actividad
Septiembre	2	Traslado de tres profesionales CECs desde Valdivia a Coyhaique.
	3-4	Adquisición de alimentos perecibles y pertrechos en Coyhaique.
	5	Traslado de siete profesionales CECs desde Valdivia a Balmaceda. Traslado de los diez profesionales CECs desde Balmaceda a Puerto Tranquilo.
	6	Arribo de los diez profesionales CECs a Caleta Tortel. Descarga del primer camión en la bodega de Tortel.
	7	Traslado de cuatro profesionales CECs a Villa O'Higgins. Arribo del camión con carga a Villa O'Higgins.
	8	Descarga de módulos y materiales desde el camión en el aeródromo de Villa O'Higgins. Retorno del personal CECs a Tortel.
	9	Organización bodega Tortel; clasificación de materiales de acuerdo a su rotulado. Arribo de tripulación del primer helicóptero; arribo del camión con combustible.
	10	Ensamblaje de la estructura de la antena del radar. Arribo del piloto y primer helicóptero al aeródromo de Caleta Tortel.
	11	Condiciones meteorológicas impiden la realización de actividades.
	12	Se realiza un intento de vuelo hacia periferia Jorge Montt, se cancela por el viento en altura. Se realiza el montaje de las unidades electrónicas del radar.
	13	Condiciones meteorológicas impiden la realización de actividades.
	14	Se realiza un vuelo con personal CECs (4) hacia Jorge Montt, periferia. Las condiciones meteorológicas solo permitieron la descarga de datos de la AWS Jorge Montt. Se realizaron pruebas de funcionamiento de las unidades electrónicas del radar. Se revisaron las conexiones de sensores y *datalogger* de las torres nivométricas.
	15	Se realiza vuelo con personal CECs (2) a periferia, Jorge Montt, para descarga de datos del sensor de nivel de agua y mantenimiento de la cámara fotográfica automática. Un segundo vuelo hace un intento para entrar al *plateau*: no se logra debido a la nubosidad.
	16	Condiciones meteorológicas impiden la realización de actividades.
	17	Se realiza un vuelo con personal CECs (3) hacia periferia, Témpano. Se ejecutan los siguientes trabajos: - Descarga de datos del sensor de nivel de agua. - Cambio de cámara automática. - Descarga de datos de la AWS. - Cambio de soporte del pluviómetro.
	18	Se realiza un vuelo de prueba con el radar alrededor del aeródromo de Tortel.
	19	Condiciones meteorológicas impiden la realización de actividades.
	20	Se realiza un vuelo de inspección con personal CECs (2) hacia los refugios de

		Greve y Témpano. Se realizan dos vuelos de radar.
	21	Se efectúa un vuelo con personal CECs (2) al refugio Greve. Se ingresa a ambos módulos. Un segundo vuelo lleva otros dos profesionales a Greve, más provisiones. Se ejecuta un tercer vuelo de radar.
	22	Se realiza un vuelo de traslado con dos personas hacia la estación Greve. Se traslada todo el personal CECs que se encuentra en Greve (6) hacia Témpano.
	23	Llega el segundo helicóptero al aeródromo de Tortel. Se accede a los módulos de la estación Témpano.
	24	Se trasladan tres personas desde Témpano a Greve. Se instala la AWS Témpano.
	25	Se realiza el traslado de la carga de Tortel hacia Villa O'Higgins mediante un camión. Se traslada la antena de radar mediante helicóptero a Villa O'Higgins. Traslado de personal CECs (3) de Cochrane a Villa O'Higgins. Se realiza vuelo desde Villa O'Higgins hacia *plateau*. Se traslada todo el personal del refugio Témpano hacia Greve, y se trasladan dos personas desde el Greve a Villa O'Higgins. En Villa O'Higgins se descarga un segundo camión con carga proveniente de Valdivia.
	26	Condiciones meteorológicas impiden la realización de actividades en el *plateau*. Durante la tarde llega el segundo helicóptero proveniente de Tortel a Villa O'Higgins.
	27	Condiciones meteorológicas impiden la realización de actividades.
	28	Se realiza un vuelo hacia el sector de periferia, Glaciar O'Higgins, donde se realizan las siguientes actividades: - Descarga datos AWS. - Mantenimiento cámara automática. - Revisión del sensor de nivel de agua. Se realizan dos vuelos de radar sobre el *plateau*.
	29	Condiciones meteorológicas impiden la realización de actividades. En el aeródromo de Villa O'Higgins se realiza el montaje del sistema LiDAR en un helicóptero.
	30	Condiciones meteorológicas impiden la realización de actividades.
Octubre	1	Se efectúa un vuelo radar y un vuelo LiDAR. Traslado de personal CECs (4) desde Greve a Villa O'Higgins. Trabajos en Estación Periferia O'Higgins.
	2	Condiciones meteorológicas favorables para LiDAR, se realizan dos vuelos. Trabajos en estación periferia O'Higgins. Traslado bases módulo 1 desde Villa O'Higgins hasta península entre Lago Chico y Lago O'Higgins.
	3	Reconocimiento de *nunataks* para instalación de estación glaciológica en Glaciar O'Higgins. Traslado de secciones módulo 1 y bases módulo 2 desde Villa O'Higgins hasta el sector península.
	4	Condiciones meteorológicas impiden la realización de actividades.

5	Transporte secciones módulo 2 y otros elementos de módulos 1 y 2 desde Villa O'Higgins a sector península. Montaje de prueba del equipo para campamento en el aeródromo Villa O'Higgins.
6	Trabajos en estación periferia O'Higgins.
7	Traslado personal CECs (3) a *nunatak* escogido para tercera Estación Glaciológica. Se monta campamento en el *nunatak*.
8	Condiciones meteorológicas impiden la realización de actividades.
9	Traslado personal CECs (3) a campamento en *nunatak* Glaciar O'Higgins. Transporte carga módulos 1 y 2 desde península a campamento. Transporte carga entre Villa O'Higgins y campamento.
10	Mediciones LiDAR (dos vuelos). Inicio armado módulo 1: Preparación de bases y anclaje de bases a roca.
11	Finalización instalación bases módulo 1. Inicio armado módulo 2.
12	Condiciones meteorológicas impiden la realización de actividades aéreas. Preparación de roca y anclaje módulo 2.
13	Condiciones meteorológicas impiden la realización de actividades.
14	Condiciones meteorológicas impiden la realización de actividades aéreas. Instalación de secciones módulo 1.
15	Montaje de la estación meteorológica meseta en Glaciar O'Higgins. Fijación secciones módulo 1.
16	Terminaciones módulo 1. Instalación estación meteorológica respaldo.
17-19	Condiciones meteorológicas impiden la realización de actividades aéreas. Finalización instalación de secciones módulos en *nunatak* Glaciar O'Higgins.
20	Condiciones meteorológicas impiden la realización de actividades aéreas. Desinstalación del equipo LiDAR en aeródromo Villa O'Higgins.
21	Nueva inspección aerotransportada a la estación meteorológica Témpano: se resuelve favorablemente lectura de datos del pluviómetro. Evacuación desechos desde refugio O'Higgins hacia Villa O'Higgins. Transporte carga desde Villa O'Higgins hasta refugio O'Higgins. Desarme estructura radar en aeródromo Villa O'Higgins.
22	Traslado personal CECs (4) desde refugio O'Higgins hasta refugio Greve.
23	Traslado personal CECs (2) desde Villa O'Higgins hasta Valdivia. Inicio travesía en motos de nieve desde refugio Greve.
24	Finalización travesía en motos de nieve en refugio Greve. Traslado de todo el personal CECs en refugio O'Higgins (4) y Greve (4) hacia Villa O'Higgins.
25	Traslado personal CECs (3) desde Villa O'Higgins hasta Coyhaique. Carga camión con equipos CECs y equipos personales para su transporte a Valdivia.
26	Traslado personal CECs (7) desde Villa O'Higgins hasta Puerto Río Tranquilo. Se trasladan tres profesionales CECs desde Coyhaique hasta Valdivia.
27	Traslado personal CECs desde Puerto Río Tranquilo hasta Coyhaique (2) y Valdivia (5).
28	Traslado personal CECs desde Valdivia (1) y Santiago (2) hasta Coyhaique para

		taller.
	29	Realización taller síntesis actividades en Coyhaique. Traslado personal CECs desde Coyhaique hasta Valdivia (3) y Santiago (2). Descarga camión en dependencias CECs en Valdivia. Cierre de campaña.

B.1 Campaña realizada entre 17/06/16 y 29/10/16

Tabla Anexo B.5 Bitácora de quinta campaña de terreno del proyecto

Mes	Día	Actividad
Junio	17	Traslado de tres profesionales CECs desde Valdivia a Coyhaique. Retiro de cargas y traslado vía terrestre hasta Villa Cerro Castillo.
	18	Traslado de 10 profesionales CECs desde Villa Cerro Castillo hasta Caleta Tortel.
	19	Chequeo de cargas.
	20	Arribo del Helicóptero a Caleta Tortel.
	21	Condiciones meteorológicas impiden la realización de actividades.
	22	Condiciones meteorológicas impiden la realización de actividades. Chequeo de partes meteorológicos para los siguientes días
	23	Condiciones meteorológicas impiden la realización de actividades.
	24	Condiciones meteorológicas impiden la realización de actividades. Trabajos logísticos en el aeródromo. Preparación final del Helicóptero y equipos científicos y de montaña.
	25	Condiciones meteorológicas impiden la realización de actividades.
	26	Se realiza un vuelo con personal CECs (3) hacia periferia, Jorge Montt. Se ejecutan los siguientes trabajos: - Mantención y descarga de datos de AWS.
	27	Se realiza un vuelo con personal CECs (3) hacia periferia, Jorge Montt. Se ejecutan los siguientes trabajos: - Descarga de imágenes y retiro de cámara fija (DGA).
	28	Condiciones meteorológicas impiden la realización de actividades. Llegada de un nuevo profesional CECs a Caleta Tortel.
	29	Traslado de profesionales CECs y de la Empresa de Helicópteros desde Caleta Tortel hasta Villa O´Higgins. Orden de cargas y chequeo de equipos.
	30	Condiciones meteorológicas impiden la realización de actividades.
	1	Se realiza un vuelo con personal CECs (4) hacia sector del Glaciar O´Higgins y Glaciar Chico. Se ejecutan los siguientes trabajos: - Mantención y descarga de datos de AWS Periferia O´Higgins. - Mantención y descarga de imágenes desde cámara fija O'higgins.
		Se realiza un vuelo con personal CECs (4) hacia sector del Tempano (meseta y periferia). Se ejecutan los siguientes trabajos: - Mantención y descarga de datos AWS Meseta.

Julio	2	- Mantención y descarga de datos de Sensor de Presión de Agua. - Descarga de imágenes y retiro de Cámara fija de Glaciar Tempano. Llegada de 3 nuevos Profesionales CECs a Villa O´Higgins.
	3	Condiciones meteorológicas impiden la realización de actividades.
	4	Condiciones meteorológicas impiden la realización de actividades. Chequeo y configuración de equipos.
	5	Condiciones meteorológicas impiden la realización de actividades. Chequeo y configuración de equipos.
	6	Condiciones meteorológicas impiden la realización de actividades.
	7	Condiciones meteorológicas impiden la realización de actividades.
	8	Condiciones meteorológicas impiden la realización de actividades.
	9	Condiciones meteorológicas impiden la realización de actividades.
	10	Traslado de Profesionales CECs hacia Estación Glaciológica Greve. Orden de equipos y mantención de refugios.
	11	Condiciones meteorológicas impiden la realización de actividades.
	12	Se realiza un vuelo con personal CECs (2) hacia sector de Estación Glaciológica O´Higgins, se ejecutan los siguientes trabajos: - Instalación de circuito eléctrico al interior del módulo principal. - Mantención y descarga de datos de AWS O'higgins Meseta. Malas condiciones meteorológicas impidieron la realización de tareas fuera de los módulos en Estación Greve.
	13	Condiciones meteorológicas impiden la realización de actividades aerotransportadas. En Estación Glaciológica Greve se realizan trabajos de mantención y de medición en pozos de densitometría.
	14	Condiciones meteorológicas impiden la realización de actividades aerotransportadas.
	15	Se realiza un vuelo con personal CECs (2) hacia sector de Estación Glaciológica Témpano, se ejecutan los siguientes trabajos: - Mantención y configuración de AWS Tempano Meseta. - Chequeo de Módulos. Extracción de personal CECs (2) desde Estación Glaciológica Greve.
	16	Extracción de personal CECs (4) desde Estación Glaciológica Greve. Bajada de Motos de Nieve desde Estación Glaciológica Greve. Bajada de Desechos y materiales desde Estación Glaciológica Greve.
	17	Orden de Equipos y cargas en camión para ser despachadas hacia Coyhaique y Valdivia.
	18	Traslado de Personal CECs (6) desde Villa O´Higgins a Puerto Rio Tranquilo. Traslado de Carga en Camión desde Villa O´Higgins a Coyhaique.
	19	Traslado de Personal CECs (6) desde Puerto Rio Tranquilo a Coyhaique.
	20	Traslado de Personal CECs (6) desde Balmaceda a Valdivia.

Anexo C *Talleres de divulgación y resultados*

En las Bases Técnicas del proyecto se contempla para todo el horizonte de acción un total de 2 Talleres de divulgación de actividades y resultados (5.1 de las Bases Técnicas), donde el primero de ellos debe ser realizado entre el cierre de la campaña N°2 de 2014 y el 19 de noviembre de 2014, fecha de entrega del presente informe.

El día viernes 14 de noviembre de 2014 a partir de las 10:00 am, profesionales del CECs dan inicio a las presentaciones del Primer Taller de Divulgación de Actividades y Resultados, en la Sala A de la Dirección de Planeamiento del MOP, ubicada en Morandé N°59 de la ciudad de Santiago. Concurren un total de 10 personas invitadas por DGA:

1. María Belén Varela.
2. Lorena LL (sic)
3. Richard Montecinos
4. Marcela Oyarzo
5. Carlos Quintana
6. Diego San Miguel
7. Jorge Huenante
8. Diego González
9. Armando Peña
10. Gladys Santias

El Taller se desarrolló según el programa y consideró las presentaciones del Sr. Felipe Amtmann, quien mostró el estado actual del avance y resultados del proyecto desde el punto de vista administrativo. Luego el Ing. Rodrigo Zamora presentó el estado de avance y actividades realizadas en cuanto a levantamientos aerotransportados y terrestres de LIDAR, GPS, Radar y GPR. Posterior a ello, el Ing. Sebastián Cisternas comentó las acciones desarrolladas en relación a la implementación y mantenimiento de estaciones meteorológicas, cámaras fotográficas y otros sensores. Finalmente el Dr. Andrés Rivera, Director del Laboratorio

de Glaciología del CECs, presentó detalles técnicos de las actividades realizadas en los primeros 9 meses de ejecución del proyecto y una Síntesis glaciológica de CHS. Finalmente tuvo lugar un espacio para consultas y discusión de las materias en referencia, concluyendo según lo programado a las 13.00hrs.

El CECs entregó a cada asistente una carpeta que contenía: Portada con el logo DGA y CECs indicando el nombre del proyecto, nombre de la actividad; lápiz pasta; hojas de apunte; programa del Taller y un Resumen Impreso del estado de avance del proyecto y Síntesis glaciológica de Campo de Hielo Sur de 11 páginas a todo color.

Antes del inicio de la actividad (a partir de las 09.45am), y durante toda la duración del taller, el CECs dispuso servicio de *coffee break* - *catering* para todos los asistentes.

Dado que la proyección de asistencia de la DGA era de hasta 30 personas, se preparó cada detalle del Taller (carpetas, apuntes, *catering*) para un número de 35 personas. Las 25 carpetas completas adicionales a las utilizadas, fueron entregadas a la Inspectora Fiscal de manera que quedaran en poder de DGA para los fines que estimaran oportunos.

Imágenes del Taller de divulgación de actividades realizado se presentan en la Figura Anexo C.1.



Figura Anexo C.1 Serie de seis imágenes del "Primer taller de divulgación de actividades y resultados" realizado el 14 de noviembre de 2014.

De acuerdo a las Bases Técnicas del proyecto (5.2, página 58, ID 1020-48-LP13) el segundo taller de difusión de actividades debía ser realizado en la ciudad de Coyhaique, Región de Aysén e informado como actividad realizada en el Cuarto Informe de Avance parcial, con fecha de entrega 19 de noviembre de 2015. Al mismo tiempo, las Bases Técnicas (5.1, página 56, ID 1020-48-LP13) señalan que el objetivo de los talleres de difusión es "exponer las actividades realizadas y resultados obtenidos por el proyecto, enfatizando en la logística y metodología aplicada para la obtención de los datos, rutas trazadas y recomendaciones futuras". En cuanto a los temas de organización, en las Bases (5.1, página 57, ID 1020-48-LP13) se establece que los talleres deberán ser realizados en dependencias de DGA, con una asistencia no superior a 30 personas, incluyendo servicio de café y proveyendo el material necesario (carpetas, fotografías). La duración estimada de cada taller es de medio día cada uno.

Con fecha 5 de octubre de 2015, la Inspección Fiscal DGA confirma la propuesta del CECs, en cuanto a realizar el segundo taller de difusión el día 29 de octubre de 2015, señalando al mismo tiempo las personas de contacto de la Dirección General de Aguas y Secretaría Ministerial de Obras Públicas en Coyhaique, para la coordinación de la actividad.

Según lo planificado, el día jueves 29 de octubre de 2015 a partir de las 09.00 AM, se dio inicio a las presentaciones del segundo taller de divulgación de actividades y resultados, en el salón auditorio MOP "Augusto Grosse", ubicado en calle Riquelme 461, 1er piso, Coyhaique. A la actividad acudieron un total de 61 personas invitadas por DGA:

1. Marcelo Lara
2. Eugenio Marzal
3. Emanuel Toledo
4. Rodrigo Zamora
5. Fernando Basilio
6. Patricio Eva
7. Waldo Romero
8. Gonzalo Mancilla
9. Cristóbal García
10. Julia Cubillos
11. Francisco Cuevas
12. Marcia Vásquez
13. Cristian Tillería
14. Sebastián Gómez
15. Giovanni Queirolo
16. Miguel Opazo
17. Vanessa Flores
18. Pedro Arismendi
19. Marcelo Lara
20. Eugenio Marzal
21. Emanuel Toledo
22. Rodrigo Zamora
23. Fernando Basilio
24. Patricio Eva
25. Waldo Romero
26. Gonzalo Mancilla
27. Cristóbal García
28. Julia Cubillos
29. Francisco Cuevas
30. Marcia Vásquez
31. Cristian Tillería
32. Sebastián Gómez
33. Giovanni Queirolo
34. Miguel Opazo
35. Vanessa Flores
36. Pedro Arismendi
37. Felipe Andrade
38. Paula Quezada
39. Hans Silva
40. Carlos Flores
41. Leonardo García
42. Roberto Doring
43. Cristian Betancourt
44. Francisco Mena
45. Felipe Amtmann
46. Pedro Sepúlveda
47. Carlos Lizama
48. Rodrigo Pérez
49. Gloria Cortez
50. Andrés Rivera
51. Diego González
52. Ramón Silva
53. Christian Contreras
54. Álvaro Salin
55. Jorge O'Kuinghttons
56. Cristian Ibarra
57. Héctor Carrera
58. José Benado
59. Karolina Redlich
60. Peter Hartmann
61. Pablo Rojas

Estas personas pertenecían a 27 instituciones, incluyendo: Ejército de Chile, SERNAPESCA, Estudio Planeamiento Aysén, MOP, SERNAGEOMIN, DGA Aysén, UGN-DGA, Ilustre Municipalidad de Coyhaique, AGAS Patagonia, SEREMI MOP, SISS, Cámara de Turismo de Puerto Aysén, Universidad de Aysén, Policía de Investigaciones de Chile, Carabineros de Chile, SEREMI de Minería, SERNATUR, Vialidad, SEA, CIEP, UGAT-SRM-MOP, Dirección Provincial de Coyhaique, CONAF, CORFO, MOP-SOP, DOH-MOP y CECs.

El Taller se desarrolló según el programa y consideró el saludo inicial del SEREMI de Obras Públicas de Aysén Sr. Cristián Manríquez Sandoval y de la Directora Regional DGA, Sra. Giovanna Gómez Gallardo. Por parte del CECs, el Arquitecto en Residencia Sr. Fernando Basilio inició las presentaciones describiendo en general al Centro de Estudios Científicos, su historia, experiencias y capacidades. Posteriormente, el Gerente de Proyectos del CECs Sr. Felipe Amtmann expuso el estado actual de avance y resultados del proyecto desde el punto de vista administrativo. Luego, el Director del Laboratorio de Glaciología del CECs y Director del proyecto Dr. Andrés Rivera, presentó el estado de avance del proyecto (incluyendo los trabajos de campaña en CHS de más de 50 días culminados el día inmediatamente anterior al de realización del taller), actividades realizadas y resultados técnicos preliminares, junto con una descripción de la zona de estudio y explicación de conceptos y bases fundamentales. Posteriormente, el profesional experto del Laboratorio de Glaciología del CECs Ing. Rodrigo Zamora, presentó detalles técnicos y resultados preliminares y de avance, basado en información y datos obtenidos mediante diversas técnicas terrestres y aerotransportadas (levantamientos aerotransportados y terrestres de LiDAR, GPS y GPR), durante la ejecución de las actividades en terreno. Posteriormente, el Arquitecto en residencia del CECs Sr. Fernando Basilio, presentó detalles

técnicos de diseño, fabricación, transporte e instalación de los módulos habitacionales de las tres estaciones Glaciológicas (Greve, Témpano y O`Higgins), implementadas por CECs durante la ejecución del proyecto. Luego, se realizó una ronda de preguntas y discusión entre los asistentes y expositores, culminando las actividades según lo planificado a las 13.20hrs.

El CECs entregó a cada asistente una carpeta nueva, sin uso, que contenía: portada impresa con el logo MOP/DGA y CECs indicando el nombre del proyecto, nombre de la actividad, lugar de realización y fecha; lápiz pasta nuevo impreso; hojas de apunte; programa del taller y un resumen impreso de los objetivos del proyecto y síntesis glaciológica de Campo de Hielo Sur, incluyendo fotografías a todo color.

Adicionalmente, CECs dispuso servicio de *catering* para todos los asistentes, el que fue ofrecido en el hall de acceso del edificio del MOP en Coyhaique, mismo lugar en que se realizaba el taller.

Aun cuando la asistencia establecida en las bases era de hasta 30 personas, se preparó cada detalle del taller (carpetas, apuntes, *catering*) para un número de 60 personas. Las carpetas completas adicionales a las utilizadas, fueron entregadas a la Dirección Regional, de manera que quedaran en poder de DGA para los fines que estimaran oportunos.

Algunas imágenes del evento se observan en Figura Anexo C.1, Figura Anexo C.2 y Figura Anexo C.3.



Figura Anexo C.2 Parte del público asistente al Taller de síntesis de actividades en Coyhaique. Imagen: 29 de octubre de 2015.



Figura Anexo C.3 Imágenes generales del segundo taller de síntesis de actividades en Coyhaique, 29 de octubre de 2015.



Figura Anexo C.4 *Catering* durante el segundo taller de síntesis de actividades en Coyhaique. Imagen: 29 de octubre de 2015.

Anexo D *Adquisición de Motos de Nieve*

Para la operación en terreno, y tal como establecen las Bases Técnicas del proyecto, se adquirieron cuatro motos de nieve. Dados los requerimientos y tareas específicas que se debe realizar con las motos es que se seleccionó y propuso el modelo SWT 600 E-tec (Figura Anexo D.1 y Figura Anexo D.2), lo que fue aprobado por la Inspección Fiscal (Figura Anexo D.3). Estas cuatro motos fueron especialmente importadas y trasladadas a la base de operaciones en Tortel, y desde allí, transportadas individualmente por helicóptero como carga colgante hasta su destino en la Estación glaciológica en la meseta de Campo de Hielo Sur. Adicionalmente, se trasladaron cuatro garajes especialmente diseñados y fabricados para el modelo de moto en referencia, construidos en estructura metálica y terciado. Cada uno de estos garajes o contenedores, fueron anclados a roca en la Estación glaciológica (Figura Anexo D.4).



2011

SKANDIC SWT

PACKAGE HIGHLIGHTS

- 12V power outlet
- Cargo rack
- 2-up seat with passenger handholds
- Grab handle on steering
- Air radiator with fan

EXTRA HIGHLIGHTS

ACE 600

- Rotax® engine with CDI
- Engine oil cooler

ENGINE CHOICE

Engine	Rotax E-TEC™ 600 H.O.	Rotax ACE™ 600
Engine details	Liquid-cooled, 3-D R.A.V.E.™	Liquid-cooled, four-stroke D.O.H.C., dry sump
Cylinders	2	2
Displacement	594.4cc / 36.3 in³	600cc / 36.6 in³
Bore	72 mm / 2.8 in.	74 mm / 2.9 in.
Stroke	73 mm / 2.9 in.	69.7 mm / 2.7 in.
Maximum engine speed	8100 RPM	7250 RPM
Carburation	Electronic Direct Injection	EFI
Recommended fuel type	Premium unleaded	Regular unleaded
Minimum octane	91	87
Fuel tank	45 liters / 12 gallons	45 liters / 12 gallons
Oil tank capacity	2.8 liters / 3 quarts	2.1 liters / 2.2 quarts

COLOR CHOICE

Yellow / Black

DIMENSIONS

Vehicle overall length	3240 mm / 127.5 in.
Vehicle overall width	1076 mm / 42.4 in.
Vehicle overall height	1330 mm / 52.3 in.
Ski stance	900 mm / 35.4 in.
Ski overall length	1040 mm / 41 in.
Track nominal width	600 mm / 24 in.
Track nominal length	3968 mm / 156 in.
Track profile height	31.8 mm / 1.25 in.

POWERTRAIN

Drive clutch type	TRA™ III	
Driven clutch type	QRS	QRS
Engagement	3000 RPM	2200 RPM
Small sprocket number of teeth	1st gear = 3.86:1 ratio	1st gear = 3.86:1 ratio
Large sprocket number of teeth	2nd gear = 2.3:1 ratio	2nd gear = 2.3:1 ratio
Drive sprocket number of teeth	9	8
Drive sprocket diameter	183 mm / 7.2 in.	183 mm / 7.2 in.
Brake system	Hydraulic with braided stainless-steel brake line	Hydraulic with braided stainless-steel brake line

SUSPENSION

Front suspension	LTS
Front shock	Motion Control
Front suspension max. travel	150 mm / 6 in.
Rear suspension	SC-5U
Center shock	Motion Control
Rear shock	HPG™
Rear suspension max. travel	356 mm / 14 in.

DRY WEIGHT 303 kg / 667 lb | 302 kg / 666 lb

FEATURES

Frame	REV-XU
Skis	Pilot DS with 9.8-inch liner
Seating	2-up modular with underseat storage
Backrest	Standard
Handlebar	Painted steel with J-hooks / Grab handle
Electric start	Standard
Reverse	Mechanical
Heated throttle lever	Standard
Heated grips	Standard
Gauge	Analog with display
Mirrors	Standard
Windshield	580 mm / 23 in.
Carbide runner	Standard
Carbide configuration	102 mm / 4 in. square type at 90°
Hitch	Tongue type

© 2010 Bombardier Recreational Products Inc. (BRP). All rights reserved. ™ and the BRP logo are trademarks of BRP or its affiliates. Products are distributed in the USA by BRP US Inc. We also manufacture the engines of Can-Am motorcycles. Because of our ongoing commitment to product quality and innovation, BRP reserves the right to make changes in design specifications, price, design, features, models or equipment without incurring any obligation.

ski-doo

Figura Anexo D.1 Ficha técnica (parte 1) de las cuatro motos Ski Doo Skandic modelo SWT 600 E-tec adquiridas para el proyecto.



Figura Anexo D.2 Ficha técnica (parte 2) de las cuatro motos Ski Doo Skandic modelo SWT 600 E-tec adquiridas para el proyecto.



Santiago 28 de Mayo 2014

Sr.:
Felipe Amtmann
Gerente de Proyectos
Centro de Estudios Científicos de Valdivia

En relación a su carta ingresada por Oficina de Partes el 20 de mayo de 2014, donde solicita la aprobación para la adquisición de 4 motos de nieve nuevas, cero kilómetros modelo Ski Doo Scandic SWT 600 E-tec.

Tras revisar las características de las motos de nieve propuestas por el Consultor, la Inspección Fiscal da su aprobación para la adquisición de las 4 motos de nieve modelo Ski Doo Scandic SWT 600 E-tec, en el marco de la licitación "Línea de base glaciológica del sector norte de Campo de Hielo Sur: glaciares Jorge Montt, Témpano y O´Higgins".

Sin otro particular,

Mª Belén Varela M.

M BELÉN VARELA M.
GEÓLOGA
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

DISTRIBUCIÓN:
- Centro de Estudios Científicos de Valdivia
- Archivo.

Figura Anexo D.3 Carta que da la aprobación para la adquisición de las cuatro motos de nieve utilizadas en CHS.



Figura Anexo D.4 Imágenes de las cuatro motos de nieve del proyecto y sus garajes respectivos.

Anexo E *Fichas de Mantención*

E.1 Campaña realizada entre 14/09/14 y 19/10/2014

E.1.1 O'Higgins

Nombre Estación:	Cámara Fija Glaciar O'Higgins
Observador:	C. Faulkioux - S. Cisternas Fecha
Propósito visita:	Descarga Fotografías - Mantención

9:30 hrs

MANTENCION

Cambio de bateria interna?	SI / ~~NO~~
Cambio de cables o aluminio del tripode?	SI / ~~NO~~
Alineación CNR1 e inclinometro en relación al mástil dentro de 0,5°	SI / ~~NO~~
Cambio de bolsas desecantes en contenedor de logger?	SI / ~~NO~~
Cambio de bolsas desecantes en contenedor de batería?	SI / ~~NO~~
Se carga nuevo programa al logger? Nombre:_____	SI / ~~NO~~

Reemplazo Instrumentos

Retirado			Instalado		
Instrumento	Modelo	Numero Serie	Instrumento	Modelo	Numero Serie

Observaciones

Se descargaron 148 fotos (6-05; 6-06). Se reinicia y repto-grama Digisnap.

Figura Anexo E.1 Ficha de mantenimiento cámara fija Glaciar O´Higgins.

E.1.2 Témpano

Nombre Estación:	Cámara Fija Glaciar Témpano
Observador:	C. Faullioux – S. Cisternas Fecha 19-10-2014
Propósito visita:	Descarga Fotografías - Mantención 9:00 hrs

MANTENCION

Cambio de bateria interna?	SI / ~~NO~~
Cambio de cables o aluminio del tripode?	SI / ~~NO~~
Alineación CNR1 e inclinometro en relación al mástil dentro de 0,5°	SI / ~~NO~~
Cambio de bolsas desecantes en contenedor de logger?	SI / ~~NO~~
Cambio de bolsas desecantes en contenedor de batería?	SI / ~~NO~~
Se carga nuevo programa al logger? Nombre:_____	SI / ~~NO~~

Reemplazo Instrumentos

Retirado			Instalado		
Instrumento	Modelo	Numero Serie	Instrumento	Modelo	Numero Serie

Observaciones

Se rescataron 567 fotos (7-05 ; 25-08)
Se reprograma Digisnap.

Figura Anexo E.2 Ficha de mantenimiento cámara fija Glaciar Témpano.

Nombre Estación:	Sensor Nivel H_2O Témpano		
Observador:	C. Faullioux - S. Cisterna	Fecha	19-10-2019
Propósito visita:	Descarga y Mantención		

10:10 hrs

MANTENCION

Cambio de bateria interna?	SI / ~~NO~~
Cambio de cables o aluminio del tripode?	SI / ~~NO~~
Alineación CNR1 e inclinometro en relación al mástil dentro de 0,5°	SI / ~~NO~~
Cambio de bolsas desecantes en contenedor de logger?	SI / ~~NO~~
Cambio de bolsas desecantes en contenedor de batería?	SI / ~~NO~~
Se carga nuevo programa al logger? Nombre:_____	SI / ~~NO~~

Reemplazo Instrumentos

Retirado			Instalado		
Instrumento	Modelo	Numero Serie	Instrumento	Modelo	Numero Serie

Observaciones

Se debe considerar Unidad Datalogger CR 850 para próximas visitas, se observa comportamiento errático.

Figura Anexo E.3 Ficha de mantenimiento sensor de nivel de agua Glaciar Témpano.

E.1.3 *Greve*

METADATA DESPUÉS DE LA MANTENCIÓN/INSTALACIÓN

Nombre Estación:	Estación Respaldo Meseta		
Observador:	C. Bravo - S. Contreras	Fecha	4 Octubre

Fotos tripode, sensores, logger, etc	(Y) / N
CNR4 se encunetra alienado con mastil e inclinómetro? Si no medir	Y / (N)
Transmisión Iridium	Y / (N)
Presión Atmosferica	(Y) / N
Logger	CR 1000
Inclinación mastil CNR4 (+ si se encuentra inclinado hacia abajo)	°
Inclinación mastil principal mirado desde CNR4 (- si es en sentido del reloj)	°
Dirección veleta relacionada a norte magnetico	0° true/magn
Altura veleta (centro helice)	cm
Altura sensor aspirado (base pagoda-superficie)	cm
Altura sensor T°H° (base pagoda-superficie)	cm
Altura SR50 en AWS (membrana-superficie)	cm
Altura SR50 en marco (membrana-superficie)	cm
Hora de salida	

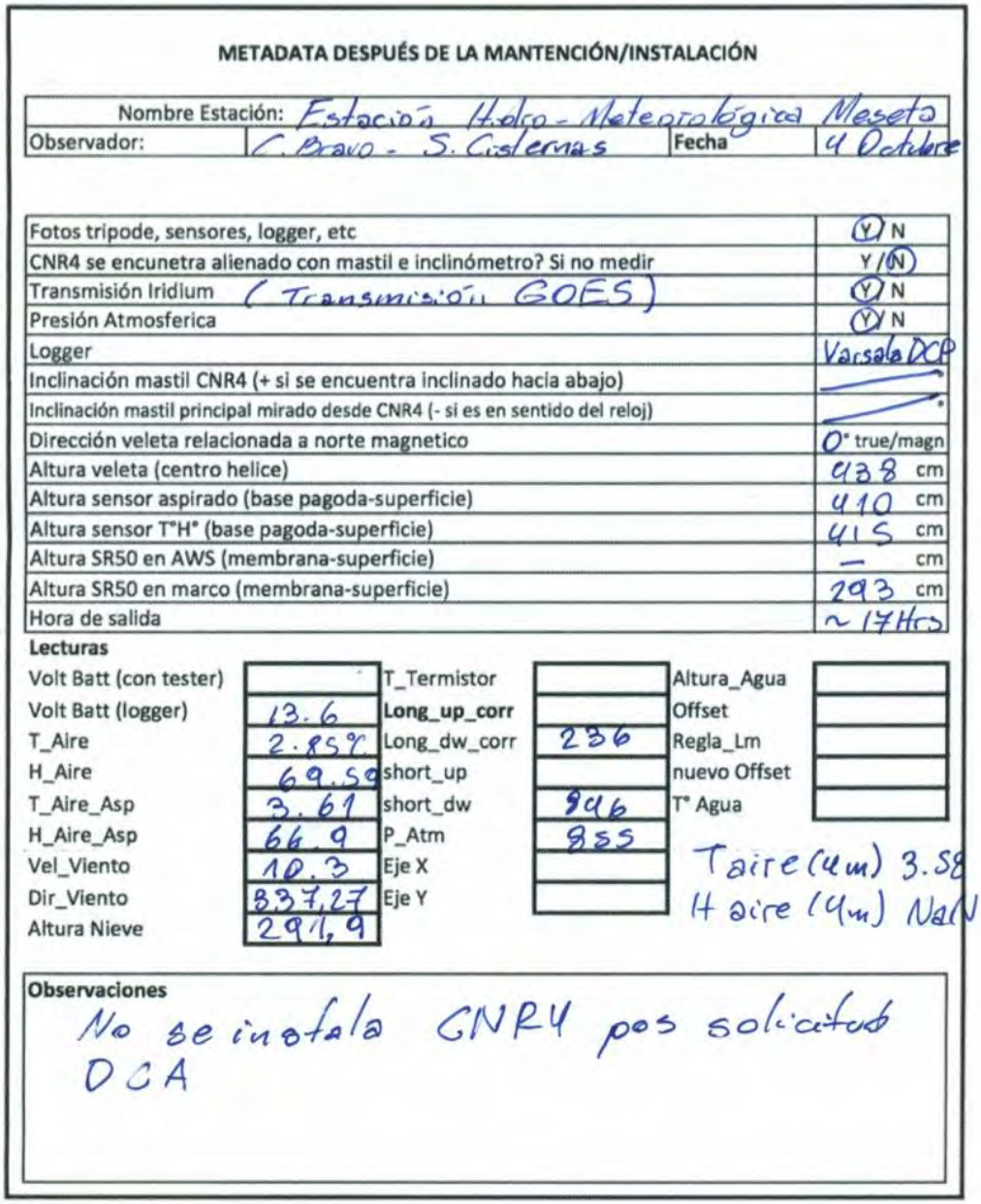
Lecturas

Volt Batt (con tester)		T_Termistor		Altura_Agua	
Volt Batt (logger)		**Long_up_corr**		Offset	
T_Aire		Long_dw_corr		Regla_Lm	
H_Aire		short_up		nuevo Offset	
T_Aire_Asp		short_dw		T° Agua	
H_Aire_Asp		P_Atm			
Vel_Viento		Eje X			
Dir_Viento		Eje Y			
Altura Nieve					

Observaciones

Datos adicionales en Ficha "Meseta"

Figura Anexo E.4 Ficha de mantenimiento Estación Meteorológica Greve Meseta Respaldo.



METADATA DESPUÉS DE LA MANTENCIÓN/INSTALACIÓN

Nombre Estación:	Estación Hidro-Meteorológica Meseta		
Observador:	C. Bravo - S. Cisternas	Fecha	4 Octubre

Fotos tripode, sensores, logger, etc	(Y) N
CNR4 se encunetra alienado con mastil e inclinómetro? Si no medir	Y / (N)
Transmisión Iridium (Transmisión GOES)	(Y) N
Presión Atmosferica	(Y) N
Logger	Varsala DCP
Inclinación mastil CNR4 (+ si se encuentra inclinado hacia abajo)	
Inclinación mastil principal mirado desde CNR4 (- si es en sentido del reloj)	
Dirección veleta relacionada a norte magnetico	0° true/magn
Altura veleta (centro helice)	438 cm
Altura sensor aspirado (base pagoda-superficie)	410 cm
Altura sensor T°H° (base pagoda-superficie)	415 cm
Altura SR50 en AWS (membrana-superficie)	— cm
Altura SR50 en marco (membrana-superficie)	293 cm
Hora de salida	~ 17 Hrs

Lecturas

Volt Batt (con tester)		T_Termistor		Altura_Agua			
Volt Batt (logger)	13.6	**Long_up_corr**		Offset			
T_Aire	2.85°C	Long_dw_corr	236	Regla_Lm			
H_Aire	69.5%	short_up		nuevo Offset			
T_Aire_Asp	3.61	short_dw	946	T° Agua			
H_Aire_Asp	66.9	P_Atm	855				
Vel_Viento	10.3	Eje X					
Dir_Viento	337,27	Eje Y					
Altura Nieve	291,9						

Taire (4m) 3.58
H aire (4m) NaN.

Observaciones

No se instala CNR4 pos solicitud DCA

Figura Anexo E.5 Ficha de mantenimiento Estación Meteorológica Greve Meseta Principal.

E.1.4 Jorge Montt

MANTENCIÓN AWS Y CHECK LIST

Nombre Estación:	Jorge Montt Glaciar		
Observador:	DG / SC / CB /	Fecha:	27/9/2014
Propósito visita:	Cambio Datalogger		

METADATA AL ARRIBO

Fecha	27/9/2014	Hora	
Hora Logger		Hora UTC	

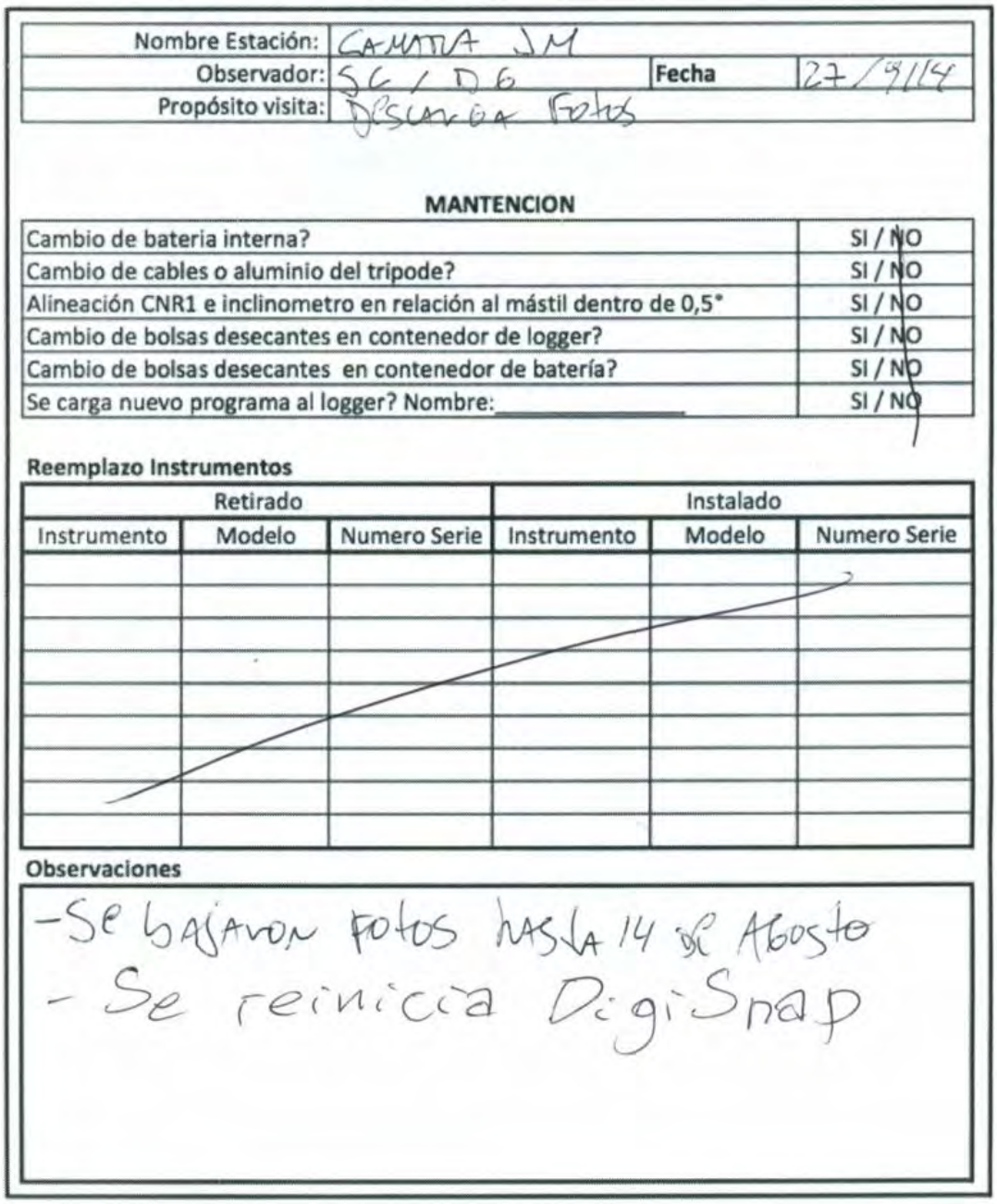
Ajuste hora logger a UTC **(siempre usar horario de verano)**	(SI) / NO
Descarga de datos y/o cambio tarjeta	SI / NO
Descargar programa del logger al PC	SI / NO
Programa en logger se ejecuta bien	SI / NO

Lecturas

Volt Batt (con tester)	11.8	T_Termistor		Altura_Agua	
Volt Batt (logger)		Long_up_corr	320 W/m²	Offset	
T_Aire	6 °C	Long_dw_corr		Regla_Lm	
H_Aire		short_up		nuevo Offset	
T_Aire_Asp		short_dw	400 W/m²	T° Agua	
H_Aire_Asp		P_Atm			
Vel_Viento		Eje X			
Dir_Viento		Eje Y			
Altura Nieve					

Fotos tripode, sensores, logger,etc	(Y) / N
Inclinación mástil CNR4 (+ si se encuentra inclinado hacia abajo)	°
Inclinación mástil principal mirado desde CNR4 (- si es en sentido del reloj)	°
Dirección veleta relacionada a norte magnetico	° true/magn
CNR4 se encunetra alienado con mastil e inclinómetro? Si no medir	Y / N
Altura sensor aspirado (base pagoda)	207 cm
Altura SR50 en AWS	/ cm
Altura SR50 en marco	/ cm
Altura veleta (centro helice)	222 cm

Figura Anexo E.6 Ficha de mantenimiento Estación Meteorológica Glaciar Jorge Montt Periferia.



Nombre Estación:	CAMARA JM		
Observador:	SG / DG	Fecha	27/9/14
Propósito visita:	DESCARGA Fotos		

MANTENCION

Cambio de bateria interna?	SI / NO
Cambio de cables o aluminio del tripode?	SI / NO
Alineación CNR1 e inclinometro en relación al mástil dentro de 0,5°	SI / NO
Cambio de bolsas desecantes en contenedor de logger?	SI / NO
Cambio de bolsas desecantes en contenedor de batería?	SI / NO
Se carga nuevo programa al logger? Nombre:_____	SI / NO

Reemplazo Instrumentos

Retirado			Instalado		
Instrumento	Modelo	Numero Serie	Instrumento	Modelo	Numero Serie

Observaciones

-Se bajaron fotos hasta 14 de Agosto
- Se reinicia DigiSnap

Figura Anexo E.7 Ficha de mantenimiento cámara fija Glaciar Jorge Montt.

E.2Campaña realizada entre 03/04/15 y 07/05/15

E.2.1 O´Higgins

METADATA DESPUÉS DE LA MANTENCIÓN/INSTALACIÓN

Nombre Estación:	Estados AWS Glaciar O'Higgins		
Observador:	José Uribe	Fecha	26/04/2015

Fotos tripode, sensores, logger, etc	(Y) / N
CNR4 se encunetra alienado con mastil e inclinómetro? Si no medir	(Y) / N
Transmisión ~~Iridium~~ GOES	(Y) / N
Presión Atmosferica	(Y) / N
Logger	CR1000
Inclinación mastil CNR4 (+ si se encuentra inclinado hacia abajo)	— °
Inclinación mastil principal mirado desde CNR4 (- si es en sentido del reloj)	— °
Dirección veleta relacionada a norte magnetico	— ° true/magn
Altura veleta (centro helice)	— cm
Altura sensor aspirado (base pagoda-superficie)	— cm
Altura sensor T°H° (base pagoda-superficie)	— cm
Altura SR50 en AWS (membrana-superficie)	— cm
Altura SR50 en marco (membrana-superficie)	— cm
Hora de salida	13:30

Lecturas

Volt Batt (con tester)	14,2	T_Termistor	—	Altura_Agua	—
Volt Batt (logger)	14,05	**Long_up_corr**	268,1	Offset	—
T_Aire	7,84	Long_dw_corr	—	Regla_Lm	—
H_Aire	61,66	short_up	467,75	nuevo Offset	—
T_Aire_Asp	8,71	short_dw	—	T° Agua	—
H_Aire_Asp	59,32	P_Atm	987,72		
Vel_Viento	1,41	Eje X	—		
Dir_Viento	12,06	Eje Y	—		
Altura Nieve	—				

Observaciones: Se cambio estructura de Wind Shield Gemar del sensor de precipitación.

Figura Anexo E.8 Ficha de mantenimiento Estacion Metereologica Glaciar O´Higgins.

Nombre Estación:	Altura nivel de Agua O'Higgins		
Observador:	José Ursúa	Fecha	26/04/2015
Propósito visita:	Mantención		

MANTENCION

Cambio de bateria interna?	SI / (NO)
Cambio de cables o aluminio del tripode?	SI / (NO)
Alineación CNR1 e inclinometro en relación al mástil dentro de 0,5°	SI / NO
Cambio de bolsas desecantes en contenedor de logger?	SI / (NO)
Cambio de bolsas desecantes en contenedor de bateria?	SI / (NO)
Se carga nuevo programa al logger? Nombre:_____	SI / (NO)

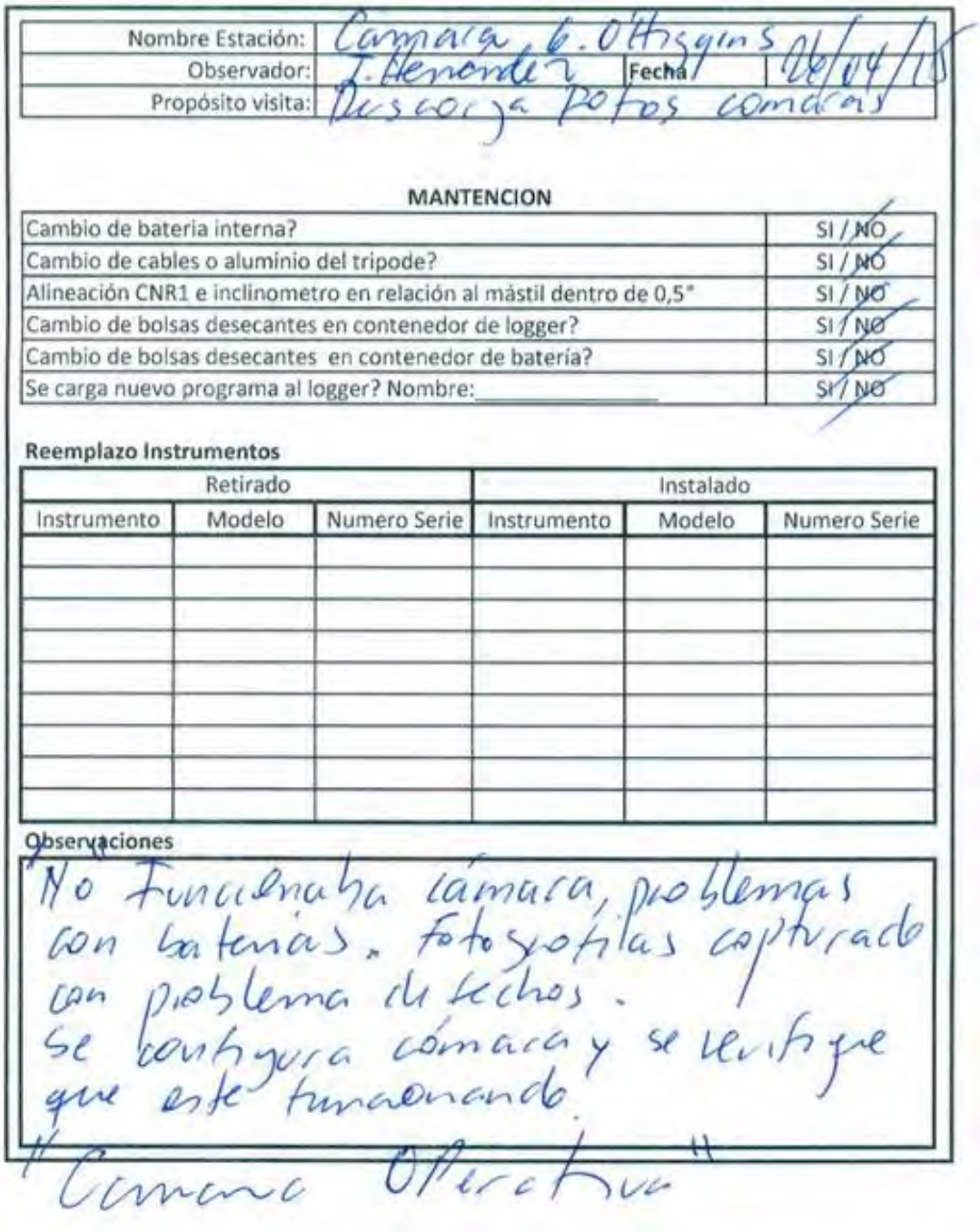
Reemplazo Instrumentos

Retirado			Instalado		
Instrumento	Modelo	Numero Serie	Instrumento	Modelo	Numero Serie

Observaciones

- Sensor de nivel de agua no está funcionando
- Hora del datalogger incorrecto. (+3 UTC)

Figura Anexo E.9 Ficha de mantenimiento sensor nivel de agua Glaciar O´Higgins.



Nombre Estación:	Camara 6. O'Higgins		
Observador:	J. Hernandez	Fecha	26/04/18
Propósito visita:	Descarga Fotos camaras		

MANTENCION

Cambio de bateria interna?	SI / NO
Cambio de cables o aluminio del tripode?	SI / NO
Alineación CNR1 e inclinometro en relación al mástil dentro de 0,5°	SI / NO
Cambio de bolsas desecantes en contenedor de logger?	SI / NO
Cambio de bolsas desecantes en contenedor de batería?	SI / NO
Se carga nuevo programa al logger? Nombre:_____	SI / NO

Reemplazo Instrumentos

Retirado			Instalado		
Instrumento	Modelo	Numero Serie	Instrumento	Modelo	Numero Serie

Observaciones

No funcionaba cámara, problemas con baterías. Fotos y fotos capturadas con problema de fechas.
Se configura cámara y se verifique que este funcionando.
Camara Operativa "

Figura Anexo E.10 Ficha de mantenimiento cámara fija Glaciar O'Higgins.

E.2.2 Témpano

METADATA DESPUÉS DE LA MANTENCIÓN/INSTALACIÓN

Nombre Estación:	Estación AWS Témpanos		
Observador:	José Uribe	Fecha	27/04/2015

Fotos tripode, sensores, logger, etc	(Y) / N
CNR4 se encunetra alienado con mastil e inclinómetro? Si no medir	(Y) / N
Transmisión ~~Iridium~~ GOES	(Y) N
Presión Atmosferica	Y / N
Logger	?
Inclinación mastil CNR4 (+ si se encuentra inclinado hacia abajo)	— °
Inclinación mastil principal mirado desde CNR4 (- si es en sentido del reloj)	— °
Dirección veleta relacionada a norte magnetico	— ° true/magn
Altura veleta (centro helice)	— cm
Altura sensor aspirado (base pagoda-superficie)	— cm
Altura sensor T°H° (base pagoda-superficie)	— cm
Altura SR50 en AWS (membrana-superficie)	— cm
Altura SR50 en marco (membrana-superficie)	— cm
Hora de salida	—

Lecturas

Volt Batt (con tester)	—	T_Termistor	—	Altura_Agua	—
Volt Batt (logger)	—	**Long_up_corr**	—	Offset	—
T_Aire	—	Long_dw_corr	—	Regla_Lm	—
H_Aire	—	short_up	—	nuevo Offset	—
T_Aire_Asp	—	short_dw	—	T° Agua	—
H_Aire_Asp	—	P_Atm	—		
Vel_Viento	—	Eje X	—		
Dir_Viento	—	Eje Y	—		
Altura Nieve	—				

Observaciones : No se logró acceder al datalogger por falta de llave especial para abrir caja de AWS.
- Se revisó sensor de precipitación, en busca de fallas en interruptor magnético, calderito, etc. Este sensor se encuentra sin problemas desde un puto de vista eléctrico.

Figura Anexo E.11 Ficha de mantenimiento Estación Meteorológica Glaciar Témpano.

Nombre Estación:	Altura de Nivel de Agua Témpanos		
Observador:	José Uribe	Fecha	27/04/2019
Propósito visita:	Mantención		

MANTENCION

Cambio de bateria interna?	SI / (NO)
Cambio de cables o aluminio del tripode?	SI / (NO)
Alineación CNR1 e inclinometro en relación al mástil dentro de 0,5°	SI / NO
Cambio de bolsas desecantes en contenedor de logger?	SI / (NO)
Cambio de bolsas desecantes en contenedor de bateria?	SI / (NO)
Se carga nuevo programa al logger? Nombre:_____	SI / (NO)

Reemplazo Instrumentos

Retirado			Instalado		
Instrumento	Modelo	Numero Serie	Instrumento	Modelo	Numero Serie
Datalogger	CR850	20823	Datalogger	CR800	27081

Observaciones

_Se reemplazó datalogger CR850 por un datalogger CR800

Figura Anexo E.12 Ficha de mantenimiento sensor de nivel de agua Glaciar Témpano.



Nombre Estación:	Cámara Tempano
Observador:	Fernández Fecha 24/04/15
Propósito visita:	Descarga fotografías

MANTENCION

Cambio de bateria interna?	SI / NO
Cambio de cables o aluminio del tripode?	SI / NO
Alineación CNR1 e inclinometro en relación al mástil dentro de 0,5°	SI / NO
Cambio de bolsas desecantes en contenedor de logger?	SI / NO
Cambio de bolsas desecantes en contenedor de bateria?	SI / NO
Se carga nuevo programa al logger? Nombre:	SI / NO

Reemplazo Instrumentos

Retirado			Instalado		
Instrumento	Modelo	Numero Serie	Instrumento	Modelo	Numero Serie

Observacipnes

Fotografías computarizado con problemas en la notación de fecha captura. Se configura fecha y hora actual.
"Cámara Operativa"

Figura Anexo E.13 Ficha de mantenimiento cámara fija Glaciar Témpano.

E.2.3 Jorge Montt

METADATA DESPUÉS DE LA MANTENCIÓN/INSTALACIÓN

Nombre Estación:	Estacion AWS Jorge Montt		
Observador:	José Uribe	Fecha	10/04/2015

Fotos tripode, sensores, logger, etc	(Y) / N
CNR4 se encunetra alienado con mastil e inclinómetro? Si no medir	Y / N
Transmisión ~~Iridium~~ GOES	(Y) / N
Presión Atmosferica	(Y) / N
Logger	CR1000
Inclinación mastil CNR4 (+ si se encuentra inclinado hacia abajo)	— °
Inclinación mastil principal mirado desde CNR4 (- si es en sentido del reloj)	— °
Dirección veleta relacionada a norte magnetico	— ° true/magn
Altura veleta (centro helice)	— cm
Altura sensor aspirado (base pagoda-superficie)	— cm
Altura sensor T°H° (base pagoda-superficie)	— cm
Altura SR50 en AWS (membrana-superficie)	— cm
Altura SR50 en marco (membrana-superficie)	— cm
Hora de salida	11:50

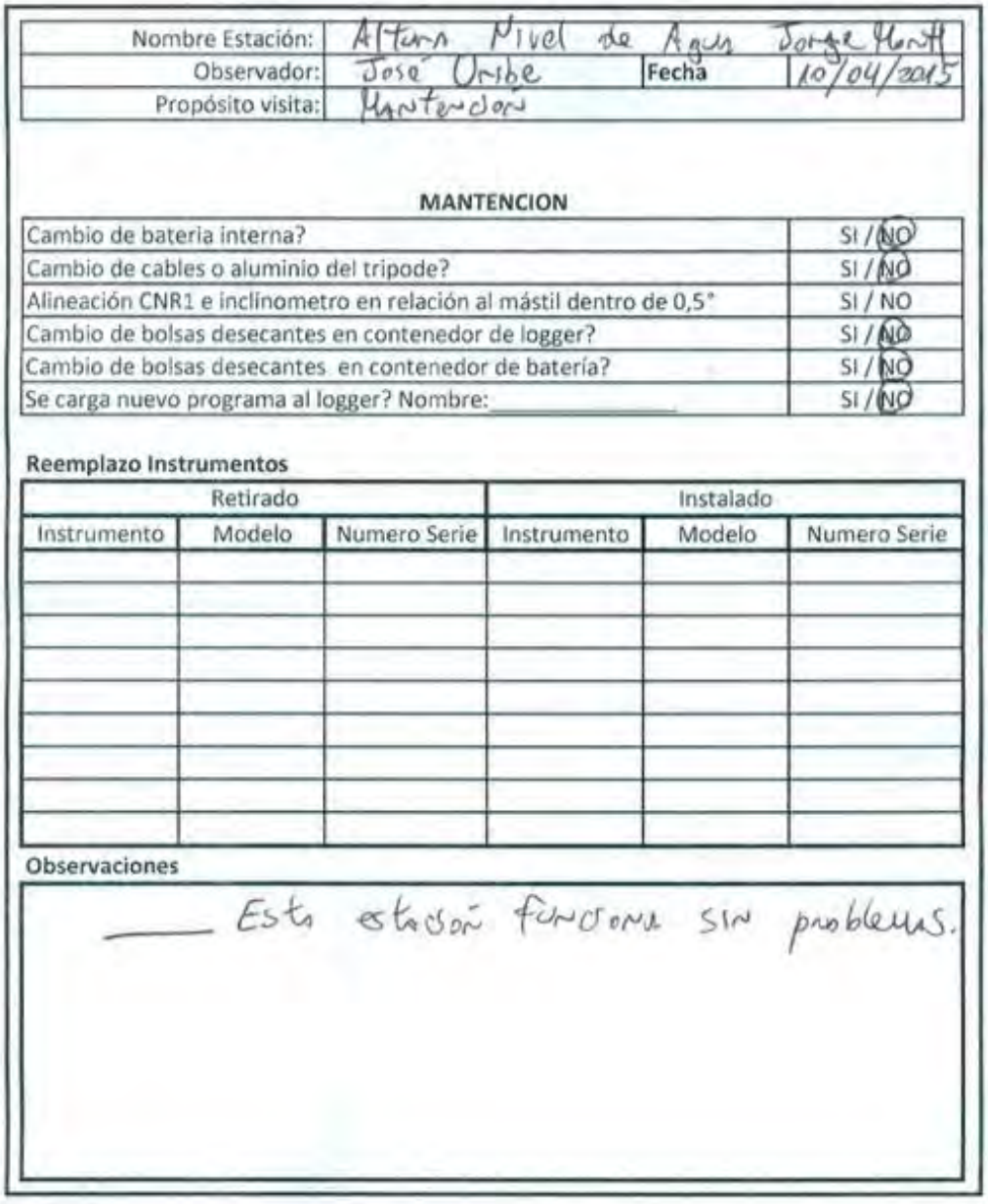
Lecturas

Volt Batt (con tester)	12.7	T_Termistor	—	Altura_Agua	—		
Volt Batt (logger)	12.61	**Long_up_corr**	353.72	Offset	—		
T_Aire	9.16	Long_dw_corr	—	Regla_Lm	—		
H_Aire	116.89	short_up	123.98	nuevo Offset	—		
T_Aire_Asp	8.85	short_dw	—	T° Agua	—		
H_Aire_Asp	91.38	P_Atm	996.96				
Vel_Viento	0,03	Eje X	—				
Dir_Viento	172.18	Eje Y	—				
Altura Nieve	—						

Observaciones

Sensor humedad Aire No aspirado (H_Aire) marca valores fuera de rango, se sugiere cambiar este sensor.

Figura Anexo E.14 Ficha de mantenimiento Estación Meteorológica Glaciar Jorge Montt Periferia.



Nombre Estación:	Altura Nivel de Agua Jorge Montt		
Observador:	José Uribe	Fecha	10/04/2015
Propósito visita:	Mantencion		

MANTENCION

Cambio de bateria interna?	SI / (NO)
Cambio de cables o aluminio del tripode?	SI / (NO)
Alineación CNR1 e inclinometro en relación al mástil dentro de 0,5°	SI / NO
Cambio de bolsas desecantes en contenedor de logger?	SI / (NO)
Cambio de bolsas desecantes en contenedor de batería?	SI / (NO)
Se carga nuevo programa al logger? Nombre:_____	SI / (NO)

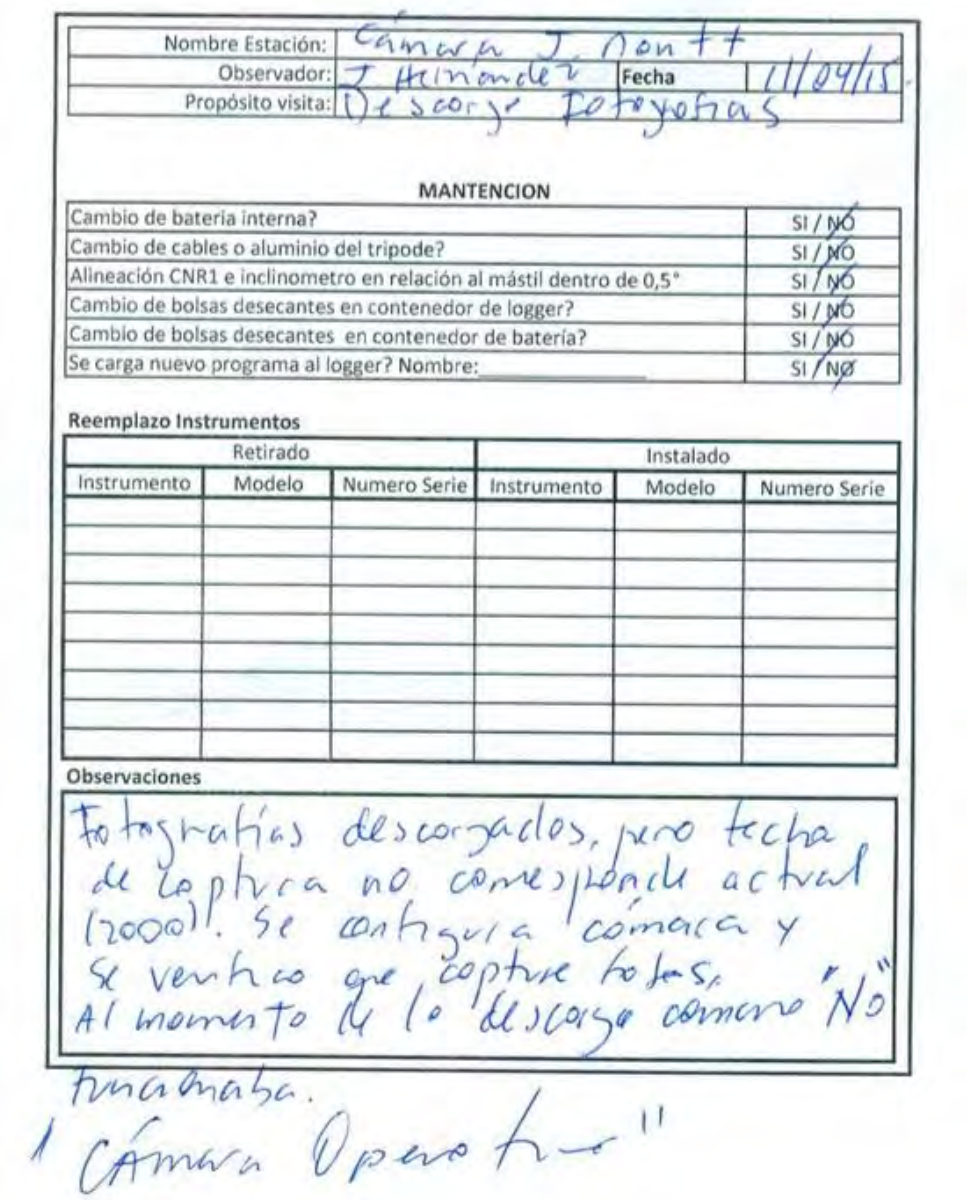
Reemplazo Instrumentos

Retirado			Instalado		
Instrumento	Modelo	Numero Serie	Instrumento	Modelo	Numero Serie

Observaciones

Esta estación funciona sin problemas.

Figura Anexo E.15 Ficha de mantenimiento sensor de agua Glaciar Jorge Montt.



Nombre Estación:	Cámara J. Montt		
Observador:	J. Hernandez	Fecha	11/04/15
Propósito visita:	Descargar Fotografías		

MANTENCION

Cambio de bateria interna?	SI / NO
Cambio de cables o aluminio del tripode?	SI / NO
Alineación CNR1 e inclinometro en relación al mástil dentro de 0,5°	SI / NO
Cambio de bolsas desecantes en contenedor de logger?	SI / NO
Cambio de bolsas desecantes en contenedor de batería?	SI / NO
Se carga nuevo programa al logger? Nombre:	SI / NO

Reemplazo Instrumentos

Retirado			Instalado		
Instrumento	Modelo	Numero Serie	Instrumento	Modelo	Numero Serie

Observaciones

Fotografías descargadas, pero fecha de captura no corresponde actual (2000). Se configura cámara y se verifica que capture fotos. Al momento de descarga cámara "No funcionaba. 1 Cámara Operativa"

Figura Anexo E.16 Ficha de mantenimiento cámara fija Glaciar Jorge Montt.

E.3 Campaña realizada entre 02/09/15 y 29/10/15

E.3.1 O'Higgins

Nombre Estación:	O'Higgins		
Observador:	Oberpaur-Hernandez	Fecha	28/09/2015
Propósito visita:	Mantencion y reparacion sistema Camara fijas		

MANTENCION

Cambio de bateria interna?	SI / NO
Cambio de cables o aluminio del tripode?	SI / NO
Alineación CNR1 e inclinometro en relación al mástil dentro de 0,5°	SI / NO
Cambio de bolsas desecantes en contenedor de logger?	SI / NO
Cambio de bolsas desecantes en contenedor de batería?	SI / NO
Se carga nuevo programa al logger? Nombre:_____	SI / NO

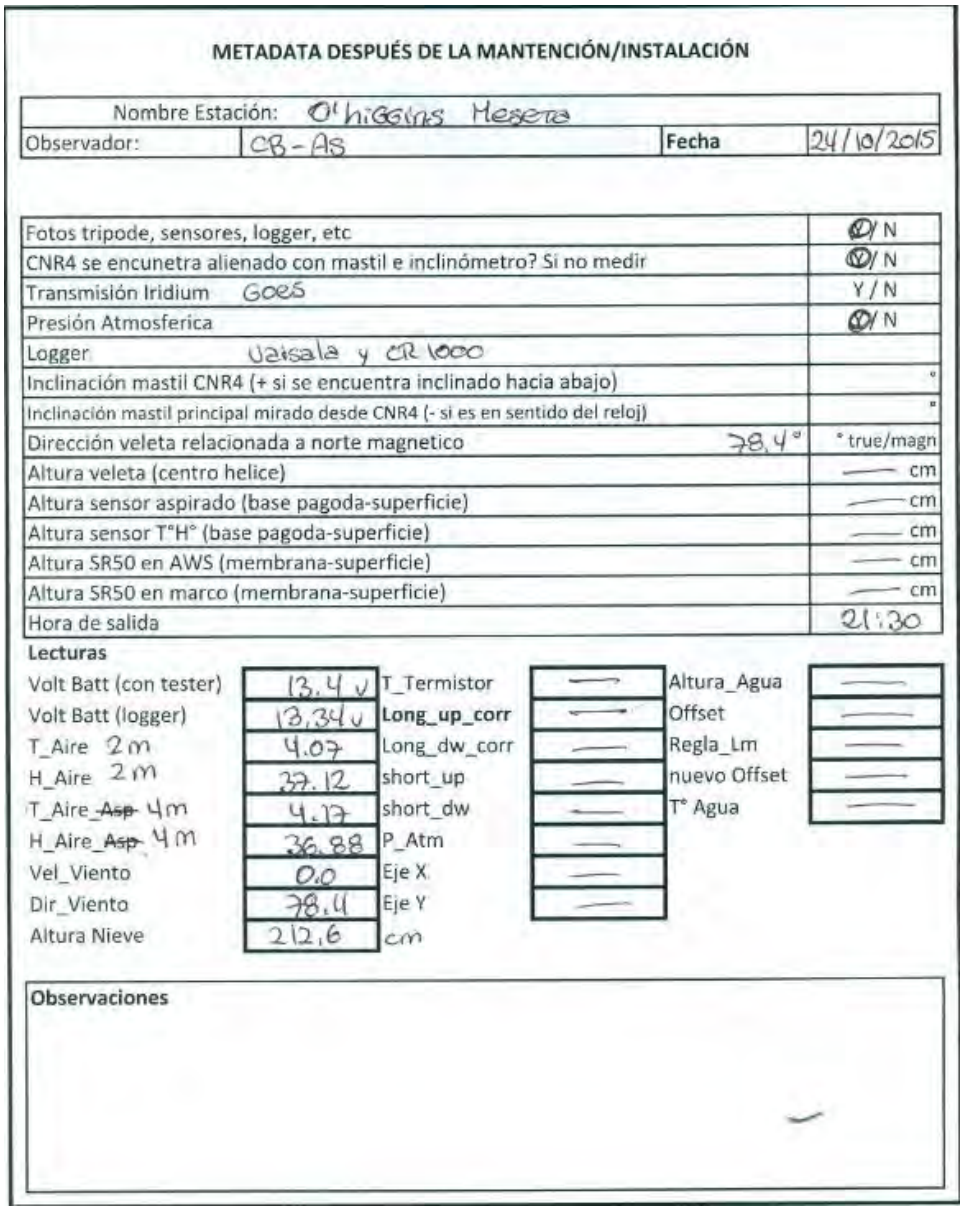
Reemplazo Instrumentos

Retirado			Instalado		
Instrumento	Modelo	Numero Serie	Instrumento	Modelo	Numero Serie
Canon	XS	3640607441	Canon	T5i	272032009075
Timer	1900		Timer		

Observaciones

Cambio de Timer y cámara.
Configuración de ambos componentes.

Figura Anexo E.17 Ficha de mantenimiento cámara Glaciar O'Higgins.



METADATA DESPUÉS DE LA MANTENCIÓN/INSTALACIÓN

Nombre Estación:	O'higgins Meseta		
Observador:	CB - AS	Fecha	24/10/2015

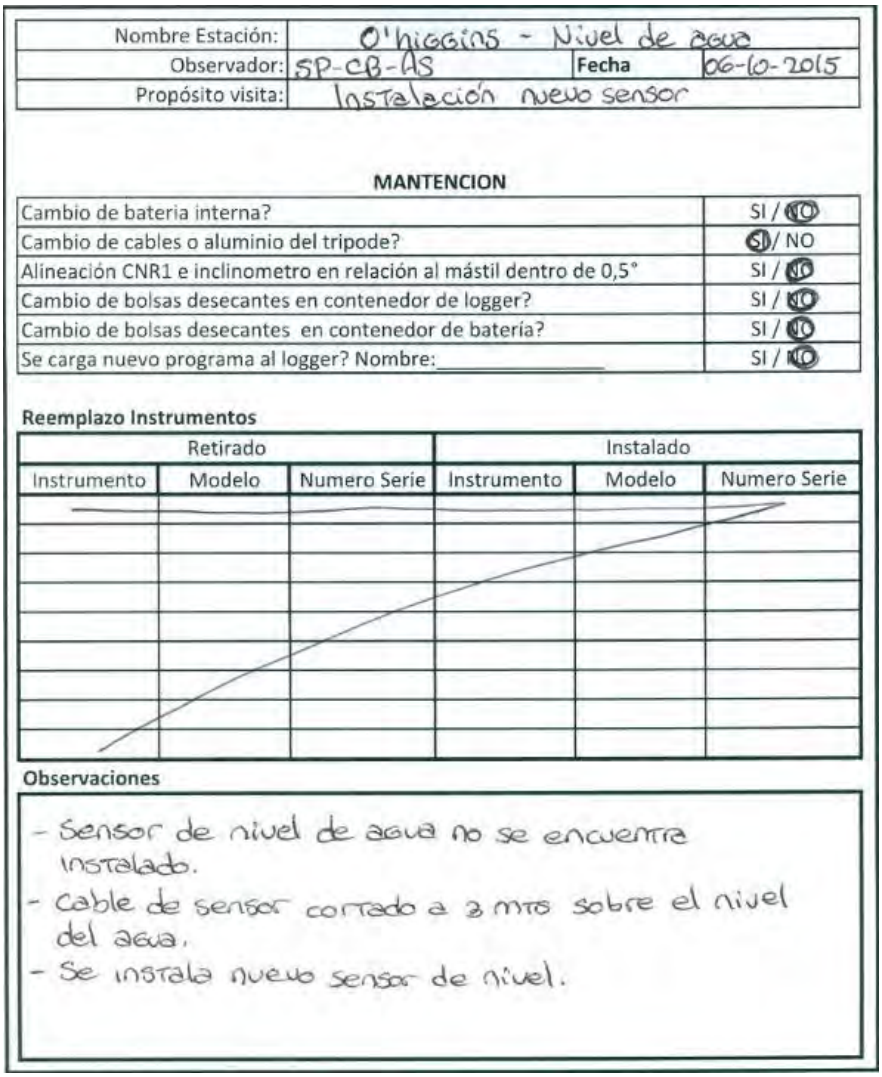
Fotos tripode, sensores, logger, etc	Ø/ N
CNR4 se encunetra alienado con mastil e inclinómetro? Si no medir	Ø/ N
Transmisión Iridium Goes	Y / N
Presión Atmosferica	Ø/ N
Logger Vaisala y CR1000	
Inclinación mastil CNR4 (+ si se encuentra inclinado hacia abajo)	°
Inclinación mastil principal mirado desde CNR4 (- si es en sentido del reloj)	°
Dirección veleta relacionada a norte magnetico 78,4°	°true/magn
Altura veleta (centro helice)	— cm
Altura sensor aspirado (base pagoda-superficie)	— cm
Altura sensor T°H° (base pagoda-superficie)	— cm
Altura SR50 en AWS (membrana-superficie)	— cm
Altura SR50 en marco (membrana-superficie)	— cm
Hora de salida	21:30

Lecturas

Volt Batt (con tester)	13,4 v	T_Termistor	—	Altura_Agua	—
Volt Batt (logger)	13,34 v	**Long_up_corr**	—	Offset	—
T_Aire 2m	4.07	Long_dw_corr	—	Regla_Lm	—
H_Aire 2m	37.12	short_up	—	nuevo Offset	—
T_Aire ~~Asp~~ 4m	4.17	short_dw	—	T° Agua	—
H_Aire ~~Asp~~ 4m	36.88	P_Atm	—		
Vel_Viento	0.0	Eje X	—		
Dir_Viento	78.4	Eje Y	—		
Altura Nieve	212,6 cm				

Observaciones

Figura Anexo E.18 Ficha de mantenimiento Estación Meteorológica Glaciar O'Higgins Meseta.



Nombre Estación:	O'higgins - Nivel de agua		
Observador:	SP-CB-AS	Fecha	06-10-2015
Propósito visita:	Instalación nuevo sensor		

MANTENCION

Cambio de bateria interna?	SI / NO
Cambio de cables o aluminio del tripode?	SI / NO
Alineación CNR1 e inclinometro en relación al mástil dentro de 0,5°	SI / NO
Cambio de bolsas desecantes en contenedor de logger?	SI / NO
Cambio de bolsas desecantes en contenedor de batería?	SI / NO
Se carga nuevo programa al logger? Nombre:_____	SI / NO

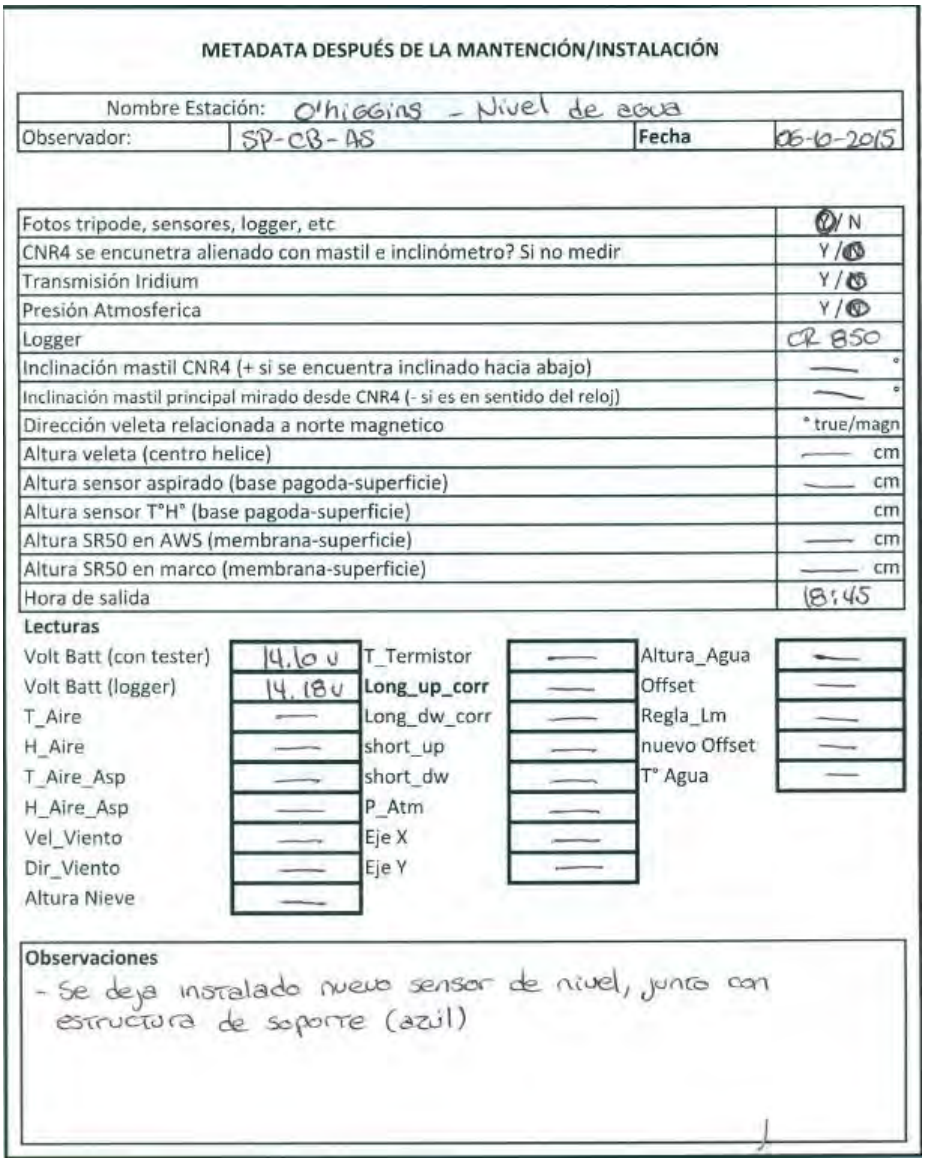
Reemplazo Instrumentos

Retirado			Instalado		
Instrumento	Modelo	Numero Serie	Instrumento	Modelo	Numero Serie

Observaciones

- Sensor de nivel de agua no se encuentra instalado.
- Cable de sensor cortado a 3 mts sobre el nivel del agua.
- Se instala nuevo sensor de nivel.

Figura Anexo E.19 Ficha de mantenimiento (parte 1) sensor de nivel de agua Glaciar O'Higgins.



METADATA DESPUÉS DE LA MANTENCIÓN/INSTALACIÓN

Nombre Estación:	O'higgins - Nivel de agua		
Observador:	SP-CB-AS	Fecha	06-01-2015

Fotos tripode, sensores, logger, etc	Y / N
CNR4 se encunetra alienado con mastil e inclinómetro? Si no medir	Y / N
Transmisión Iridium	Y / N
Presión Atmosferica	Y / N
Logger	CR 850
Inclinación mastil CNR4 (+ si se encuentra inclinado hacia abajo)	— °
Inclinación mastil principal mirado desde CNR4 (- si es en sentido del reloj)	— °
Dirección veleta relacionada a norte magnetico	° true/magn
Altura veleta (centro helice)	— cm
Altura sensor aspirado (base pagoda-superficie)	— cm
Altura sensor T°H° (base pagoda-superficie)	cm
Altura SR50 en AWS (membrana-superficie)	— cm
Altura SR50 en marco (membrana-superficie)	— cm
Hora de salida	18:45

Lecturas

Volt Batt (con tester)	14.10 v	T_Termistor	—	Altura_Agua	—
Volt Batt (logger)	14.18 v	**Long_up_corr**	—	Offset	—
T_Aire	—	Long_dw_corr	—	Regla_Lm	—
H_Aire	—	short_up	—	nuevo Offset	—
T_Aire_Asp	—	short_dw	—	T° Agua	—
H_Aire_Asp	—	P_Atm	—		
Vel_Viento	—	Eje X	—		
Dir_Viento	—	Eje Y	—		
Altura Nieve	—				

Observaciones

- Se deja instalado nuevo sensor de nivel, junto con estructura de soporte (azul)

Figura Anexo E.20 Ficha de mantenimiento (parte 2) sensor de nivel de agua Glaciar O'Higgins.

Nombre Estación:	O'higgins Periferia		
Observador:	SP-CB	Fecha	01-10-2015
Propósito visita:	Descarga de datos y Mantención		

MANTENCION

Cambio de bateria interna?	SI / NO
Cambio de cables o aluminio del tripode?	SI / NO
Alineación CNR1 e inclinometro en relación al mástil dentro de 0,5°	SI / NO
Cambio de bolsas desecantes en contenedor de logger?	SI / NO
Cambio de bolsas desecantes en contenedor de batería?	SI / NO
Se carga nuevo programa al logger? Nombre:_____	SI / NO

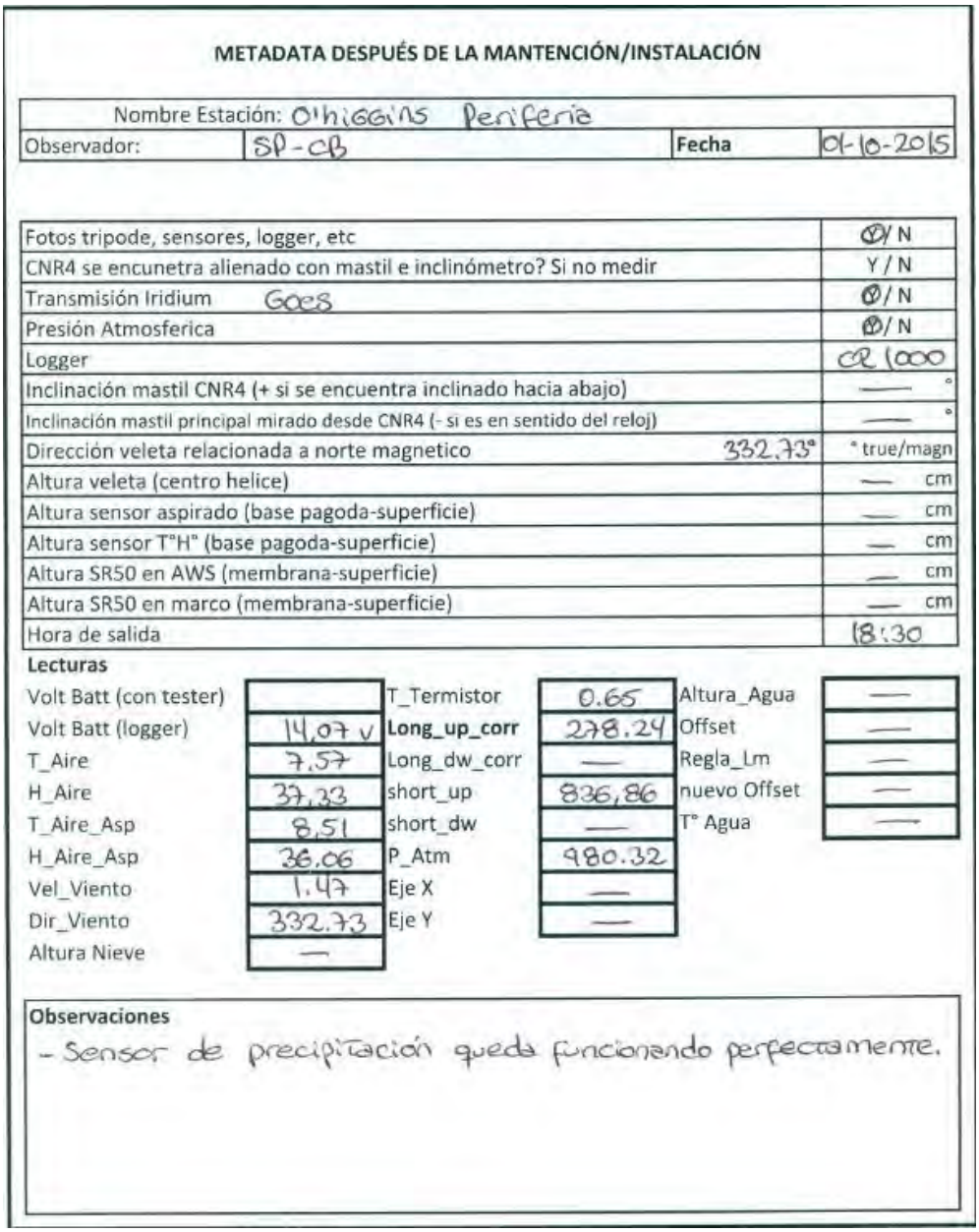
Reemplazo Instrumentos

Retirado			Instalado		
Instrumento	Modelo	Numero Serie	Instrumento	Modelo	Numero Serie

Observaciones

- Se reconecta pluviómetro ya que se encontraba cable cortado en regleta del sensor,

Figura Anexo E.21 Ficha de mantenimiento (parte 1) Estación Meteorológica Glaciar O'Higgins Periferia.



METADATA DESPUÉS DE LA MANTENCIÓN/INSTALACIÓN

Nombre Estación:	O'higgins Periferia		
Observador:	SP - CB	**Fecha**	01-10-2015

Fotos tripode, sensores, logger, etc	Ø/ N
CNR4 se encunetra alienado con mastil e inclinómetro? Si no medir	Y / N
Transmisión Iridium Goes	Ø/ N
Presión Atmosferica	Ø/ N
Logger	CR1000
Inclinación mastil CNR4 (+ si se encuentra inclinado hacia abajo)	— °
Inclinación mastil principal mirado desde CNR4 (- si es en sentido del reloj)	— °
Dirección veleta relacionada a norte magnetico 332.73°	° true/magn
Altura veleta (centro helice)	— cm
Altura sensor aspirado (base pagoda-superficie)	— cm
Altura sensor T°H° (base pagoda-superficie)	— cm
Altura SR50 en AWS (membrana-superficie)	— cm
Altura SR50 en marco (membrana-superficie)	— cm
Hora de salida	18:30

Lecturas

Volt Batt (con tester)		T_Termistor	0.65	Altura_Agua	—
Volt Batt (logger)	14,07 v	**Long_up_corr**	278.24	Offset	—
T_Aire	7.57	Long_dw_corr	—	Regla_Lm	—
H_Aire	37.33	short_up	836,86	nuevo Offset	—
T_Aire_Asp	8,51	short_dw	—	T° Agua	—
H_Aire_Asp	36.06	P_Atm	980.32		
Vel_Viento	1.47	Eje X	—		
Dir_Viento	332.73	Eje Y	—		
Altura Nieve	—				

Observaciones

- Sensor de precipitación queda funcionando perfectamente.

Figura Anexo E.22 Ficha de mantenimiento (parte 2) Estación Meteorológica Glaciar O'Higgins Periferia.

E.3.2 Témpano

Nombre Estación:	Tempano		
Observador:	Hernandez	**Fecha**	17/09/2015
Propósito visita:	mantencion camaras fijas		

MANTENCION

Cambio de bateria interna?	SI / NO
Cambio de cables o aluminio del tripode?	SI / NO
Alineación CNR1 e inclinometro en relación al mástil dentro de 0,5°	SI / NO
Cambio de bolsas desecantes en contenedor de logger?	SI / NO
Cambio de bolsas desecantes en contenedor de batería?	SI / NO
Se carga nuevo programa al logger? Nombre:_____	SI / NO

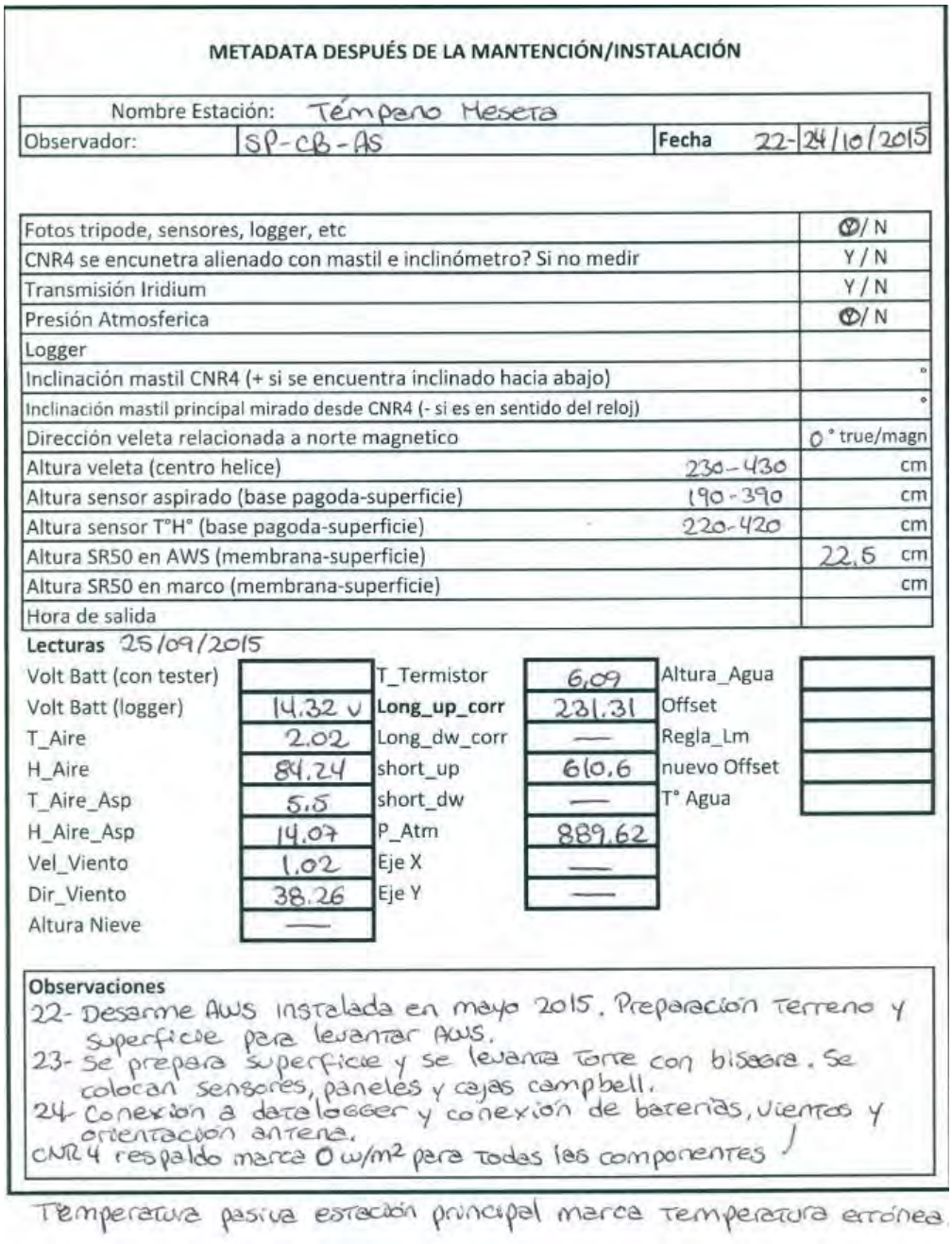
Reemplazo Instrumentos

Retirado			Instalado		
Instrumento	Modelo	Numero Serie	Instrumento	Modelo	Numero Serie
Canon	XS	344063885	Camara	TSI	2220320080

Observaciones

modificación cámara y configuración Timer de acuerdo a parámetros estableciados compañas pleiadas.

Figura Anexo E.23 Ficha de mantenimiento cámara fija Glaciar Témpano.



METADATA DESPUÉS DE LA MANTENCIÓN/INSTALACIÓN

Nombre Estación:	Témpano Meseta		
Observador:	SP-CB-AS	Fecha	22-24/10/2015

Fotos tripode, sensores, logger, etc		Ⓨ / N
CNR4 se encunetra alienado con mastil e inclinómetro? Si no medir		Y / N
Transmisión Iridium		Y / N
Presión Atmosferica		Ⓨ / N
Logger		
Inclinación mastil CNR4 (+ si se encuentra inclinado hacia abajo)		°
Inclinación mastil principal mirado desde CNR4 (- si es en sentido del reloj)		°
Dirección veleta relacionada a norte magnetico		0 ° true/magn
Altura veleta (centro helice)	230-430	cm
Altura sensor aspirado (base pagoda-superficie)	190-390	cm
Altura sensor T°H° (base pagoda-superficie)	220-420	cm
Altura SR50 en AWS (membrana-superficie)		22,5 cm
Altura SR50 en marco (membrana-superficie)		cm
Hora de salida		

Lecturas 25/09/2015

Volt Batt (con tester)		T_Termistor	6,09	Altura_Agua	
Volt Batt (logger)	14,32 v	**Long_up_corr**	231,31	Offset	
T_Aire	2.02	Long_dw_corr	—	Regla_Lm	
H_Aire	84,24	short_up	610,6	nuevo Offset	
T_Aire_Asp	5,5	short_dw	—	T° Agua	
H_Aire_Asp	14,07	P_Atm	889,62		
Vel_Viento	1,02	Eje X	—		
Dir_Viento	38,26	Eje Y	—		
Altura Nieve	—				

Observaciones

22- Desarme AWS instalada en mayo 2015. Preparación terreno y superficie para levantar AWS.
23- Se prepara superficie y se levanta torre con bisagra. Se colocan sensores, paneles y cajas campbell.
24- Conexión a datalogger y conexión de baterías, vientos y orientación antena.
CNR4 respaldo marca 0 w/m2 para todas las componentes

Temperatura pasiva estación principal marca temperatura errónea

Figura Anexo E.24 Ficha de mantenimiento Estación Meteorológica Glaciar Témpano Meseta.

METADATA DESPUÉS DE LA MANTENCIÓN/INSTALACIÓN

Nombre Estación:	Témpano nivel de agua Periferia		
Observador:	AS	**Fecha**	17-09-2015

Fotos tripode, sensores, logger, etc	Y / N
CNR4 se encunetra alienado con mastil e inclinómetro? Si no medir	Y / N
Transmisión Iridium	Y / N
Presión Atmosferica	Y / N
Logger	
Inclinación mastil CNR4 (+ si se encuentra inclinado hacia abajo)	°
Inclinación mastil principal mirado desde CNR4 (- si es en sentido del reloj)	°
Dirección veleta relacionada a norte magnetico	° true/magn
Altura veleta (centro helice)	cm
Altura sensor aspirado (base pagoda-superficie)	cm
Altura sensor T°H° (base pagoda-superficie)	cm
Altura SR50 en AWS (membrana-superficie)	cm
Altura SR50 en marco (membrana-superficie)	cm
Hora de salida	

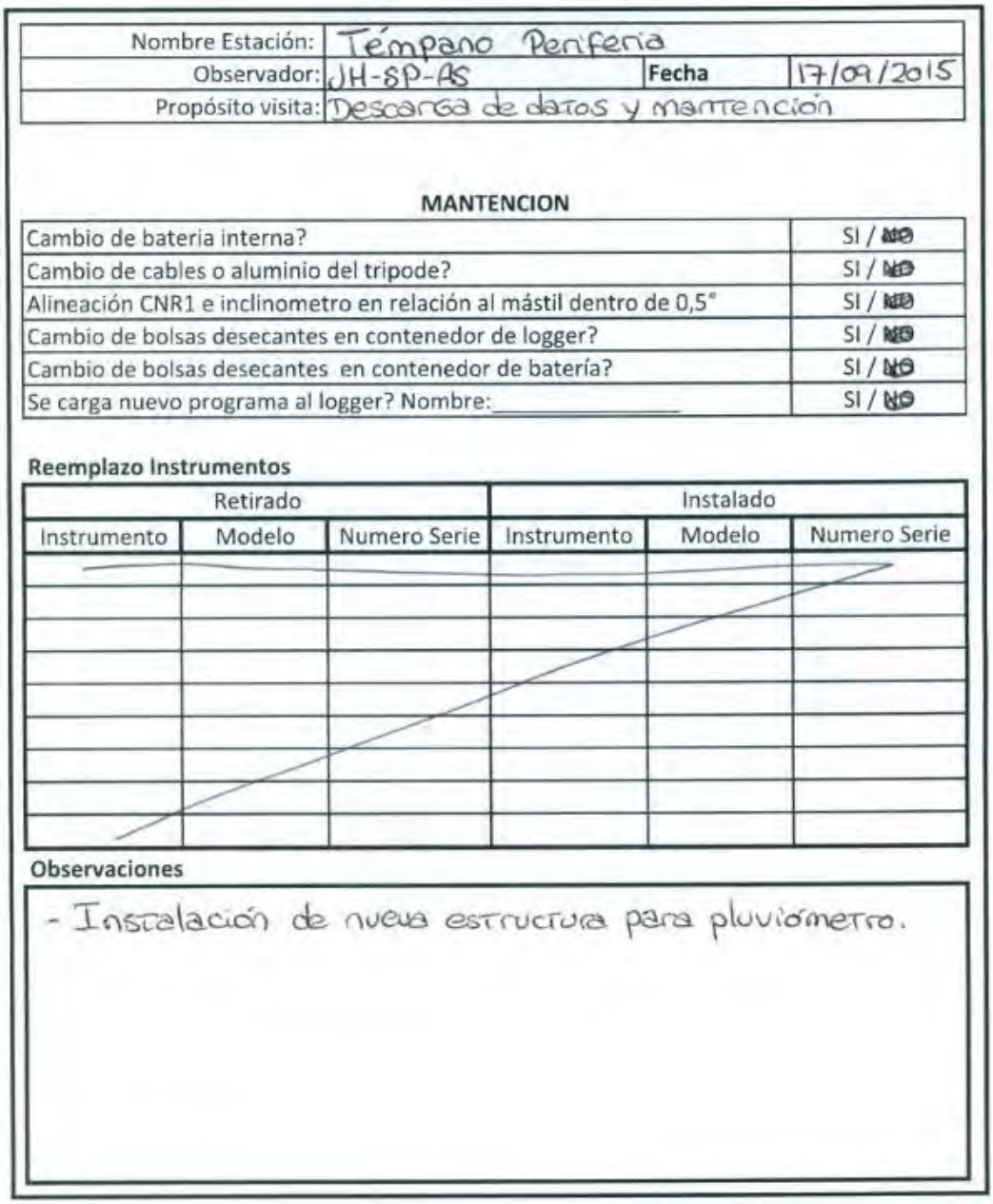
Lecturas

Volt Batt (con tester)	14.01	T_Termistor		Altura_Agua	0.68
Volt Batt (logger)	12.82	**Long_up_corr**		Offset	
T_Aire		Long_dw_corr		Regla_Lm	
H_Aire		short_up		nuevo Offset	
T_Aire_Asp		short_dw		T° Agua	
H_Aire_Asp		P_Atm			
Vel_Viento		Eje X			
Dir_Viento		Eje Y			
Altura Nieve					

Observaciones

- Datalogger funcionando correctamente.

Figura Anexo E.25 Ficha de mantenimiento sensor nivel de agua Glaciar Témpano.



Nombre Estación:	Témpano Periferia		
Observador:	JH-SP-AS	Fecha	17/09/2015
Propósito visita:	Descarga de datos y mantención		

MANTENCION

Cambio de bateria interna?	SI / NO
Cambio de cables o aluminio del tripode?	SI / NO
Alineación CNR1 e inclinometro en relación al mástil dentro de 0,5°	SI / NO
Cambio de bolsas desecantes en contenedor de logger?	SI / NO
Cambio de bolsas desecantes en contenedor de batería?	SI / NO
Se carga nuevo programa al logger? Nombre:_____	SI / NO

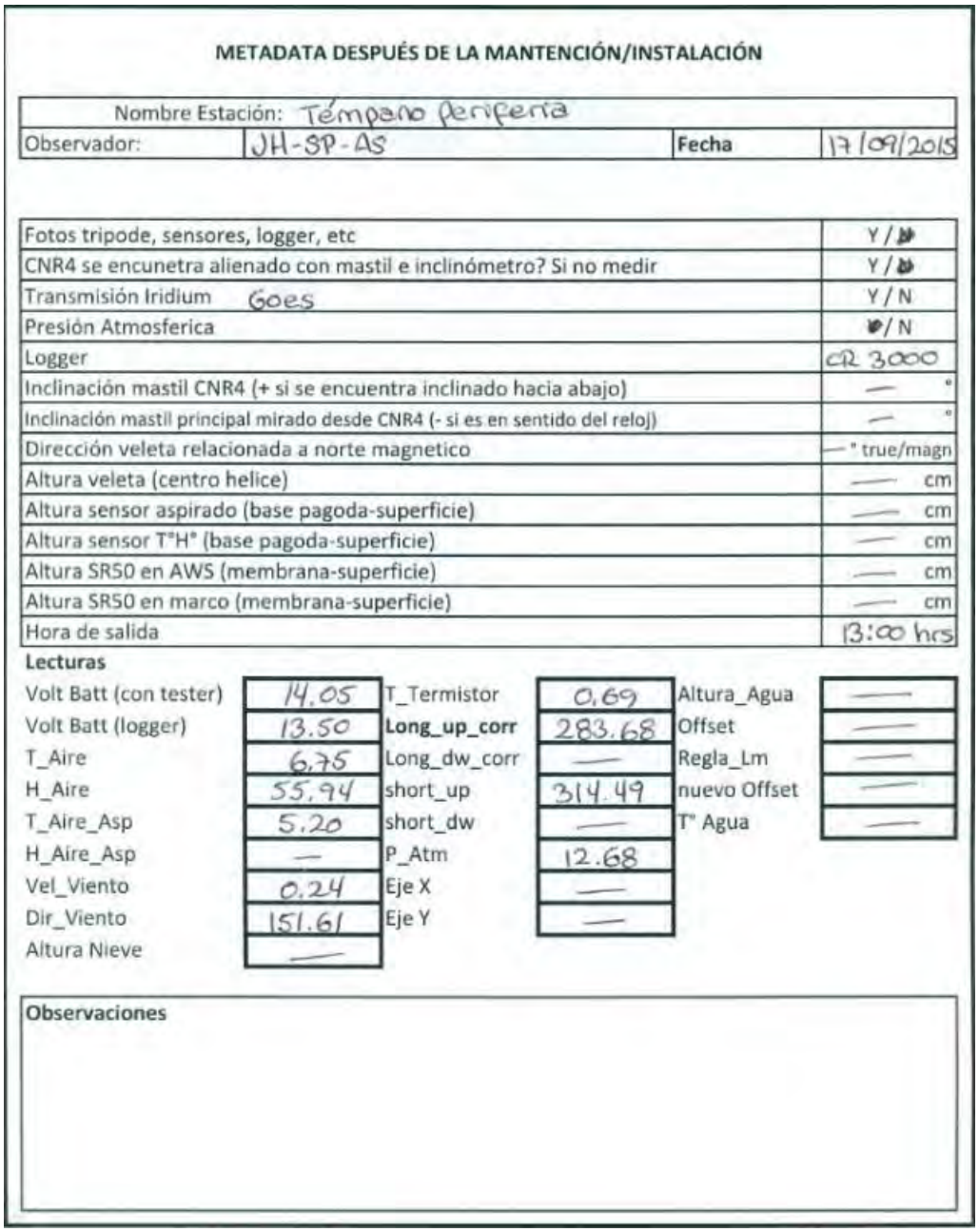
Reemplazo Instrumentos

Retirado			Instalado		
Instrumento	Modelo	Numero Serie	Instrumento	Modelo	Numero Serie

Observaciones

- Instalación de nueva estructura para pluviómetro.

Figura Anexo E.26 Ficha de mantenimiento (parte 1) Estación Meteorológica Glaciar Témpano Periferia.



METADATA DESPUÉS DE LA MANTENCIÓN/INSTALACIÓN

Nombre Estación:	Témpano periferia		
Observador:	JH-SP-AS	Fecha	17/09/2015

Fotos tripode, sensores, logger, etc	Y / N
CNR4 se encunetra alienado con mastil e inclinómetro? Si no medir	Y / N
Transmisión Iridium Goes	Y / N
Presión Atmosferica	Y / N
Logger	CR 3000
Inclinación mastil CNR4 (+ si se encuentra inclinado hacia abajo)	— °
Inclinación mastil principal mirado desde CNR4 (- si es en sentido del reloj)	— °
Dirección veleta relacionada a norte magnetico	— ° true/magn
Altura veleta (centro helice)	— cm
Altura sensor aspirado (base pagoda-superficie)	— cm
Altura sensor T°H° (base pagoda-superficie)	— cm
Altura SR50 en AWS (membrana-superficie)	— cm
Altura SR50 en marco (membrana-superficie)	— cm
Hora de salida	13:00 hrs

Lecturas

Volt Batt (con tester)	14.05	T_Termistor	0.69	Altura_Agua	—
Volt Batt (logger)	13.50	**Long_up_corr**	283.68	Offset	—
T_Aire	6.75	Long_dw_corr	—	Regla_Lm	—
H_Aire	55.94	short_up	314.49	nuevo Offset	—
T_Aire_Asp	5.20	short_dw	—	T° Agua	—
H_Aire_Asp	—	P_Atm	12.68		
Vel_Viento	0.24	Eje X	—		
Dir_Viento	151.61	Eje Y	—		
Altura Nieve	—				

Observaciones

Figura Anexo E.27 Ficha de mantenimiento (parte 2) Estación Meteorológica Glaciar Témpano periferia.

E.3.3 Greve

MANTENCIÓN AWS Y CHECK LIST

Nombre Estación:	AWS Greve Meseta Principal		
Observador:	AS	**Fecha:**	28-09-2015
Propósito visita:	Mantención y descarga de datos		

METADATA AL ARRIBO

Fecha	28/09/2015	Hora	16:28 PM
Hora Logger	07:28	Hora UTC	-3

Ajuste hora logger a UTC **(siempre usar horario de verano)**	(SI) / NO
Descarga de datos y/o cambio tarjeta	(SI) / NO
Descargar programa del logger al PC	SI / (NO)
Programa en logger se ejecuta bien	(SI) / NO

Lecturas

Volt Batt (con tester)	13,95	T_Termistor	N/A	Altura_Agua	N/A
Volt Batt (logger)	13.6	**Long_up_corr**	N/A	Offset	
T_Aire	-5,26	Long_dw_corr	N/A	Regla_Lm	
H_Aire	92,17	short_up	N/A	nuevo Offset	
T_Aire_Asp	N/A	short_dw		T° Agua	N/A
H_Aire_Asp	N/A	P_Atm	853,0		
Vel_Viento	2.6	Eje X			
Dir_Viento	136	Eje Y			
Altura Nieve	N/A				

Fotos tripode, sensores, logger,etc	(Y) / N	
Inclinación mástil CNR4 (+ si se encuentra inclinado hacia abajo)	N/A	°
Inclinación mástil principal mirado desde CNR4 (- si es en sentido del reloj)	N/A	°
Dirección veleta relacionada a norte magnetico	136	° true/magn
CNR4 se encunetra alienado con mastil e inclinómetro? Si no medir	N/A ~~Y/N~~	
Altura sensor aspirado (base pagoda)	326	cm
Altura SR50 en AWS	N/A	cm
Altura SR50 en marco	N/A	cm
Altura veleta (centro helice)	340	cm

Figura Anexo E.28 Ficha de mantenimiento (parte 1) Estación Meteorológica Greve Meseta Principal.

Nombre Estación:	AWS Greve Meseta Principal		
Observador:	AS	**Fecha**	28-09-2015
Propósito visita:	Mantención y descarga de datos		

MANTENCION

Cambio de bateria interna?	SI / (NO)
Cambio de cables o aluminio del tripode?	SI / (NO)
Alineación CNR1 e inclinometro en relación al mástil dentro de 0,5°	SI / (NO)
Cambio de bolsas desecantes en contenedor de logger?	SI / (NO)
Cambio de bolsas desecantes en contenedor de batería?	SI / (NO)
Se carga nuevo programa al logger? Nombre:_____	SI / (NO)

Reemplazo Instrumentos

Retirado			Instalado		
Instrumento	Modelo	Numero Serie	Instrumento	Modelo	Numero Serie
Pyranomet.	CMP3-L		Pyranometro	CMP-3L	141589
			Antena	25316	N/A
			Pagoda	41003-5	N/A

Observaciones

- Se instala nuevo piranometro a datalogger vaisala
- Instalación y reemplazo de nueva antena
- Instalación y reemplazo de pagoda para sensor de temperatura y humedad de AWS principal.

Figura Anexo E.29 Ficha de mantenimiento (parte 2) Estación Meteorológica Greve Meseta Principal.

METADATA DESPUÉS DE LA MANTENCIÓN/INSTALACIÓN

Nombre Estación:	AWS Greve Meseta Principal		
Observador:	AS	**Fecha**	28-09-2015

Fotos tripode, sensores, logger, etc	Ⓨ / N
CNR4 se encunetra alienado con mastil e inclinómetro? Si no medir	N/A ~~Y / N~~
Transmisión Iridium	Y / N
Presión Atmosferica	Y / N
Logger	
Inclinación mastil CNR4 (+ si se encuentra inclinado hacia abajo)	N/A °
Inclinación mastil principal mirado desde CNR4 (- si es en sentido del reloj)	N/A °
Dirección veleta relacionada a norte magnetico	136° true/magn
Altura veleta (centro helice)	340 cm
Altura sensor aspirado (base pagoda-superficie)	326 cm
Altura sensor T°H° (base pagoda-superficie)	cm
Altura SR50 en AWS (membrana-superficie)	N/A cm
Altura SR50 en marco (membrana-superficie)	N/A cm
Hora de salida	

Lecturas

Volt Batt (con tester)	13,95	T_Termistor	N/A	Altura_Agua	N/A
Volt Batt (logger)	13,6	**Long_up_corr**	N/A	Offset	
T_Aire	-5,26	Long_dw_corr	N/A	Regla_Lm	
H_Aire	92,17	short_up	N/A	nuevo Offset	
T_Aire_Asp	N/A	short_dw		T° Agua	N/A
H_Aire_Asp	N/A	P_Atm	853.0		
Vel_Viento	2.6	Eje X			
Dir_Viento	136	Eje Y			
Altura Nieve	N/A				

Observaciones

Figura Anexo E.30 Ficha de mantenimiento (parte 3) Estación Meteorológica Greve Meseta Principal.

E.3.4 Jorge Montt

Nombre Estación:	J. montt
Observador:	Pulgar - Hernandez Fecha 13/03/15
Propósito visita:	mantencion y reposicion de Tinos

MANTENCION

Cambio de bateria interna?	SI / NO
Cambio de cables o aluminio del tripode?	SI / NO
Alineación CNR1 e inclinometro en relación al mástil dentro de 0,5°	SI / NO
Cambio de bolsas desecantes en contenedor de logger?	SI / NO
Cambio de bolsas desecantes en contenedor de batería?	SI / NO
Se carga nuevo programa al logger? Nombre:_____	SI / NO

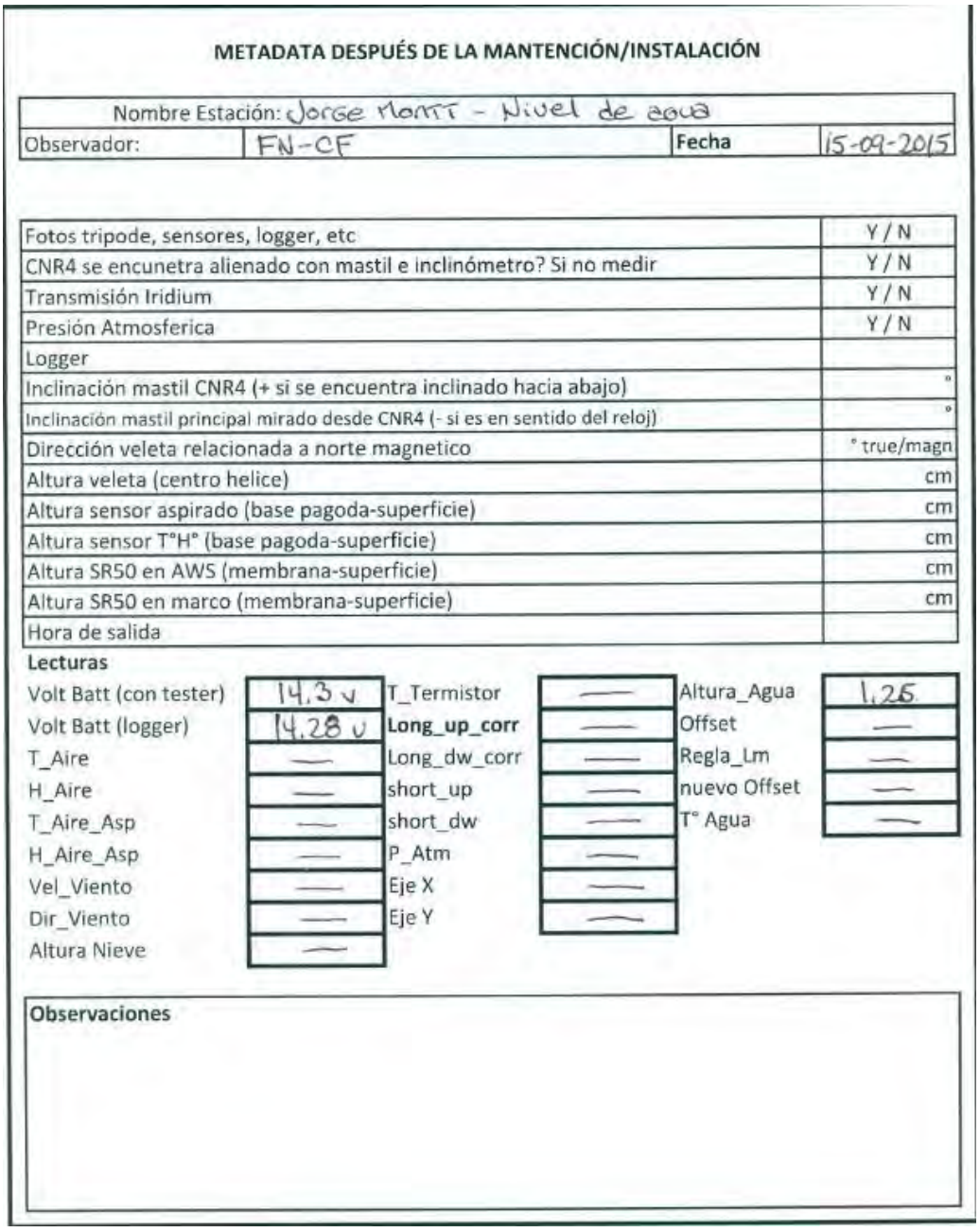
Reemplazo Instrumentos

Retirado			Instalado		
Instrumento	Modelo	Numero Serie	Instrumento	Modelo	Numero Serie
Cámara	XS	364063947	Canon	T5i	222032019042

Observaciones

Reconfigurar Timer e instalación de camara fotográfica.

Figura Anexo E.31 Ficha de mantenimiento cámara fija Glaciar Jorge Montt.



METADATA DESPUÉS DE LA MANTENCIÓN/INSTALACIÓN

Nombre Estación: Jorge Montt - Nivel de agua			
Observador:	FN-CF	Fecha	15-09-2015

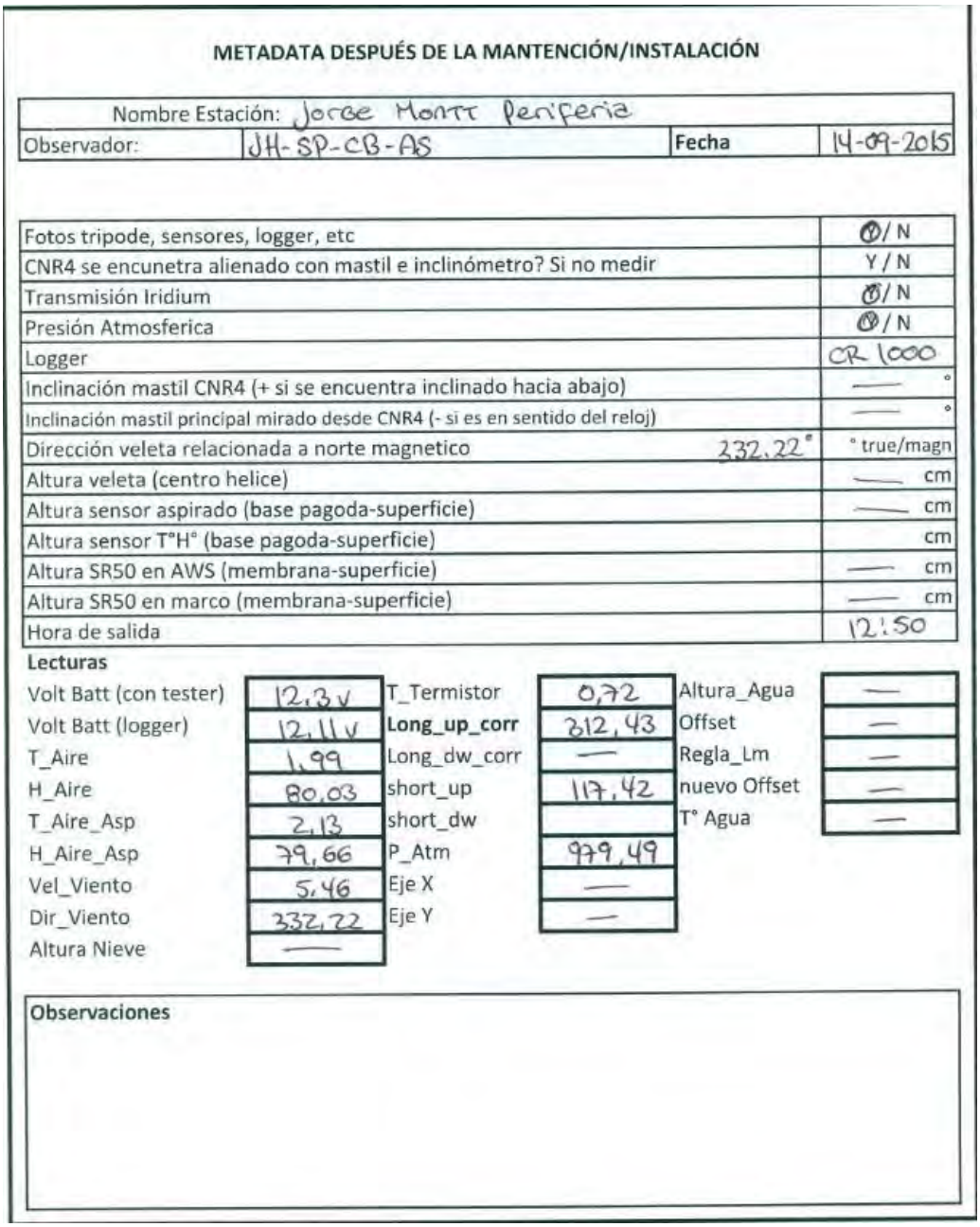
Fotos tripode, sensores, logger, etc	Y / N
CNR4 se encunetra alienado con mastil e inclinómetro? Si no medir	Y / N
Transmisión Iridium	Y / N
Presión Atmosferica	Y / N
Logger	
Inclinación mastil CNR4 (+ si se encuentra inclinado hacia abajo)	°
Inclinación mastil principal mirado desde CNR4 (- si es en sentido del reloj)	°
Dirección veleta relacionada a norte magnetico	° true/magn
Altura veleta (centro helice)	cm
Altura sensor aspirado (base pagoda-superficie)	cm
Altura sensor T°H° (base pagoda-superficie)	cm
Altura SR50 en AWS (membrana-superficie)	cm
Altura SR50 en marco (membrana-superficie)	cm
Hora de salida	

Lecturas

Volt Batt (con tester)	14,3 v	T_Termistor	—	Altura_Agua	1,25
Volt Batt (logger)	14,28 v	**Long_up_corr**	—	Offset	—
T_Aire	—	Long_dw_corr	—	Regla_Lm	—
H_Aire	—	short_up	—	nuevo Offset	—
T_Aire_Asp	—	short_dw	—	T° Agua	—
H_Aire_Asp	—	P_Atm	—		
Vel_Viento	—	Eje X	—		
Dir_Viento	—	Eje Y	—		
Altura Nieve	—				

Observaciones

Figura Anexo E.32 Ficha de mantenimiento sistema nivel de agua Glaciar Jorge Montt.



METADATA DESPUÉS DE LA MANTENCIÓN/INSTALACIÓN

Nombre Estación:	Jorge Montt Periferia		
Observador:	JH-SP-CB-AS	**Fecha**	14-09-2015

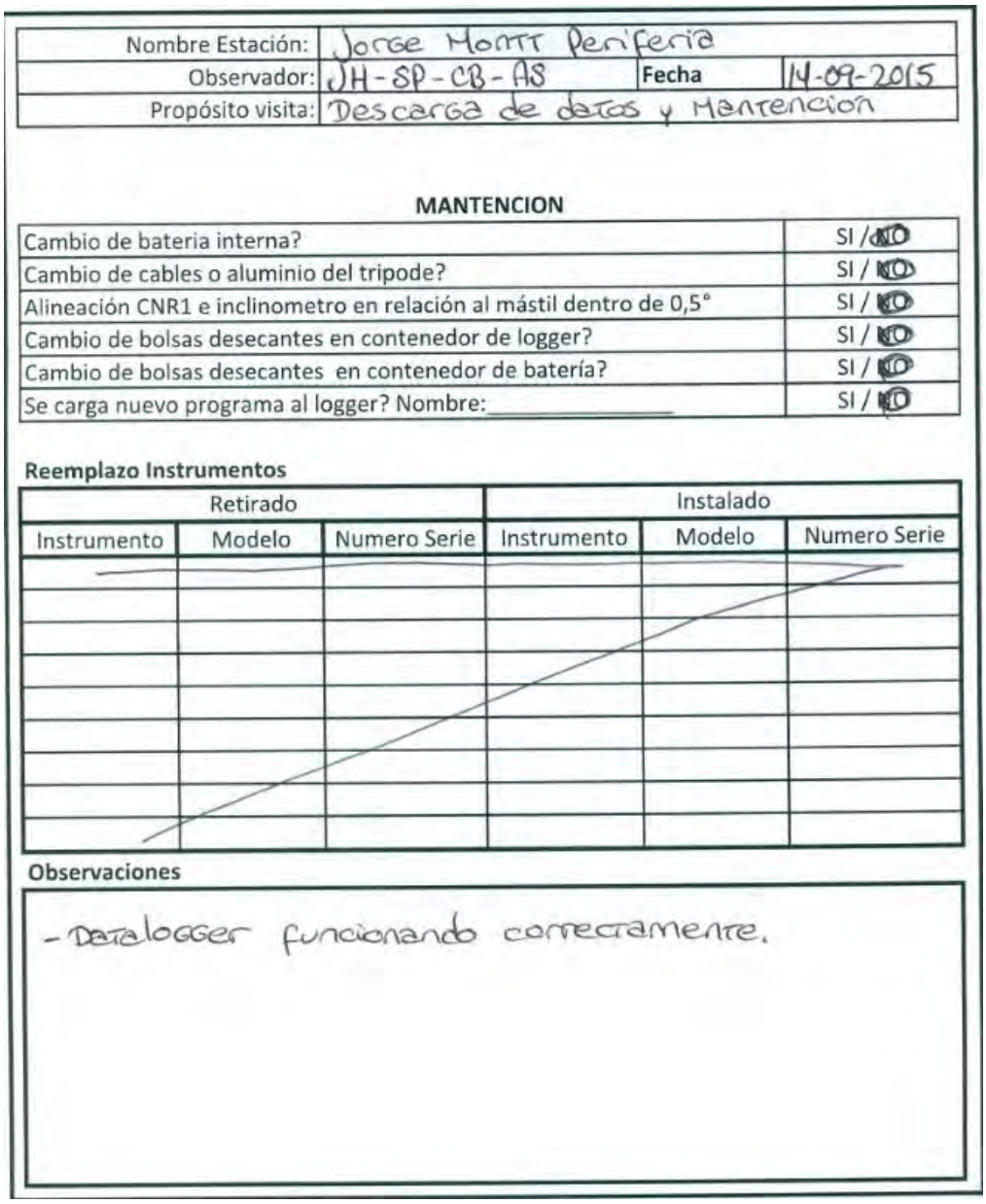
Fotos tripode, sensores, logger, etc	Ⓨ / N
CNR4 se encunetra alienado con mastil e inclinómetro? Si no medir	Y / N
Transmisión Iridium	Ⓨ / N
Presión Atmosferica	Ⓨ / N
Logger	CR 1000
Inclinación mastil CNR4 (+ si se encuentra inclinado hacia abajo)	— °
Inclinación mastil principal mirado desde CNR4 (- si es en sentido del reloj)	— °
Dirección veleta relacionada a norte magnetico 332,22°	° true/magn
Altura veleta (centro helice)	— cm
Altura sensor aspirado (base pagoda-superficie)	— cm
Altura sensor T°H° (base pagoda-superficie)	cm
Altura SR50 en AWS (membrana-superficie)	— cm
Altura SR50 en marco (membrana-superficie)	— cm
Hora de salida	12:50

Lecturas

Volt Batt (con tester)	12,3 V	T_Termistor	0,72	Altura_Agua	—
Volt Batt (logger)	12,11 V	**Long_up_corr**	312,43	Offset	—
T_Aire	1,99	Long_dw_corr	—	Regla_Lm	—
H_Aire	80,03	short_up	117,42	nuevo Offset	—
T_Aire_Asp	2,13	short_dw		T° Agua	—
H_Aire_Asp	79,66	P_Atm	979,49		
Vel_Viento	5,46	Eje X	—		
Dir_Viento	332,22	Eje Y	—		
Altura Nieve	—				

Observaciones

Figura Anexo E.33 Ficha de mantenimiento (parte 1) periferia Glaciar Jorge Montt.



Nombre Estación:	Jorge Montt Periferia		
Observador:	JH-SP-CB-AS	Fecha	14-09-2015
Propósito visita:	Descarga de datos y Mantencion		

MANTENCION

Cambio de bateria interna?	SI / NO
Cambio de cables o aluminio del tripode?	SI / NO
Alineación CNR1 e inclinometro en relación al mástil dentro de 0,5°	SI / NO
Cambio de bolsas desecantes en contenedor de logger?	SI / NO
Cambio de bolsas desecantes en contenedor de batería?	SI / NO
Se carga nuevo programa al logger? Nombre:_____	SI / NO

Reemplazo Instrumentos

Retirado			Instalado		
Instrumento	Modelo	Numero Serie	Instrumento	Modelo	Numero Serie

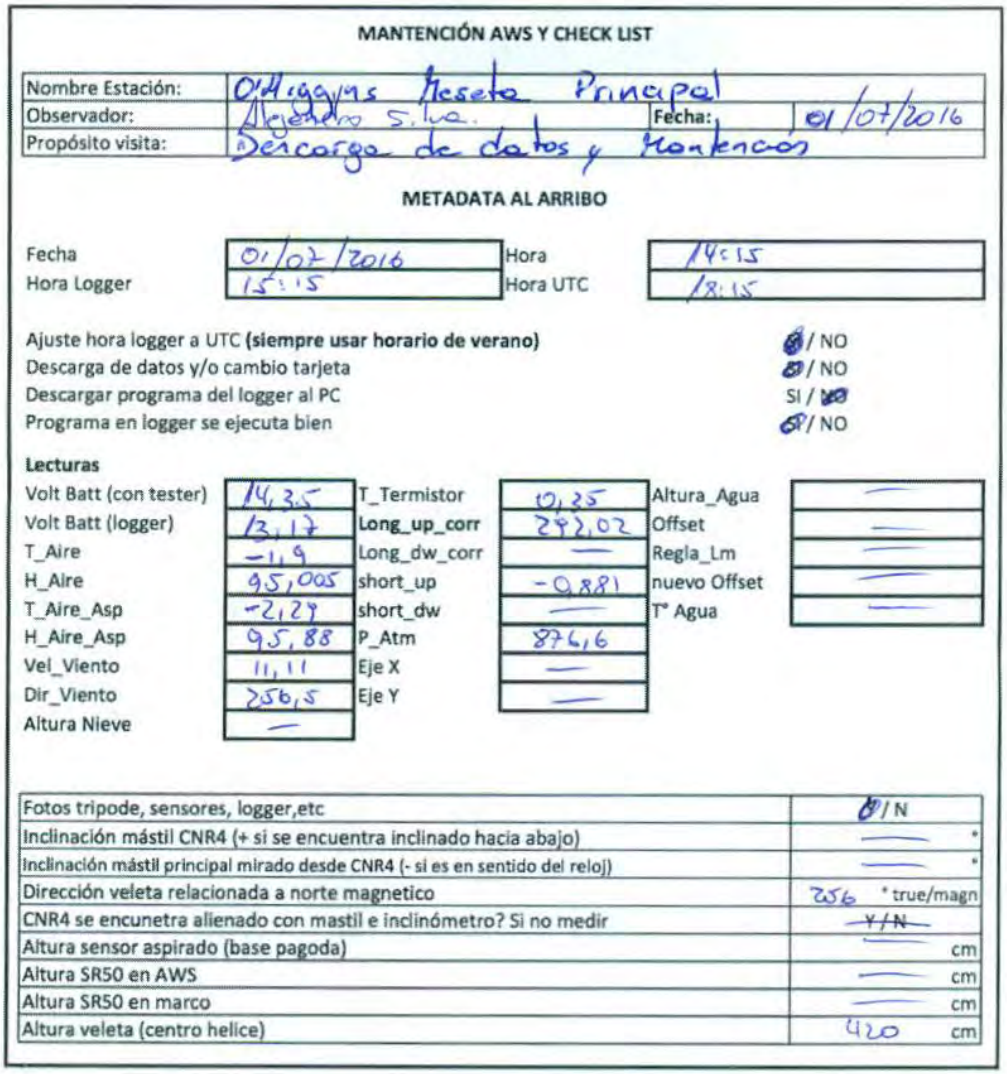
Observaciones

- Datalogger funcionando correctamente.

Figura Anexo E.34 Ficha de mantenimiento (parte 2) periferia Glaciar Jorge Montt.

E.4 Campaña realizada entre 17/06/16 y 18/07/16

E.4.1 O'Higgins



MANTENCIÓN AWS Y CHECK LIST

Nombre Estación:	O'Higgins Meseta Principal		
Observador:	Alejandro Silva.	Fecha:	01/07/2016
Propósito visita:	Descarga de datos y Mantención		

METADATA AL ARRIBO

Fecha	01/07/2016	Hora	14:15
Hora Logger	15:15	Hora UTC	18:15

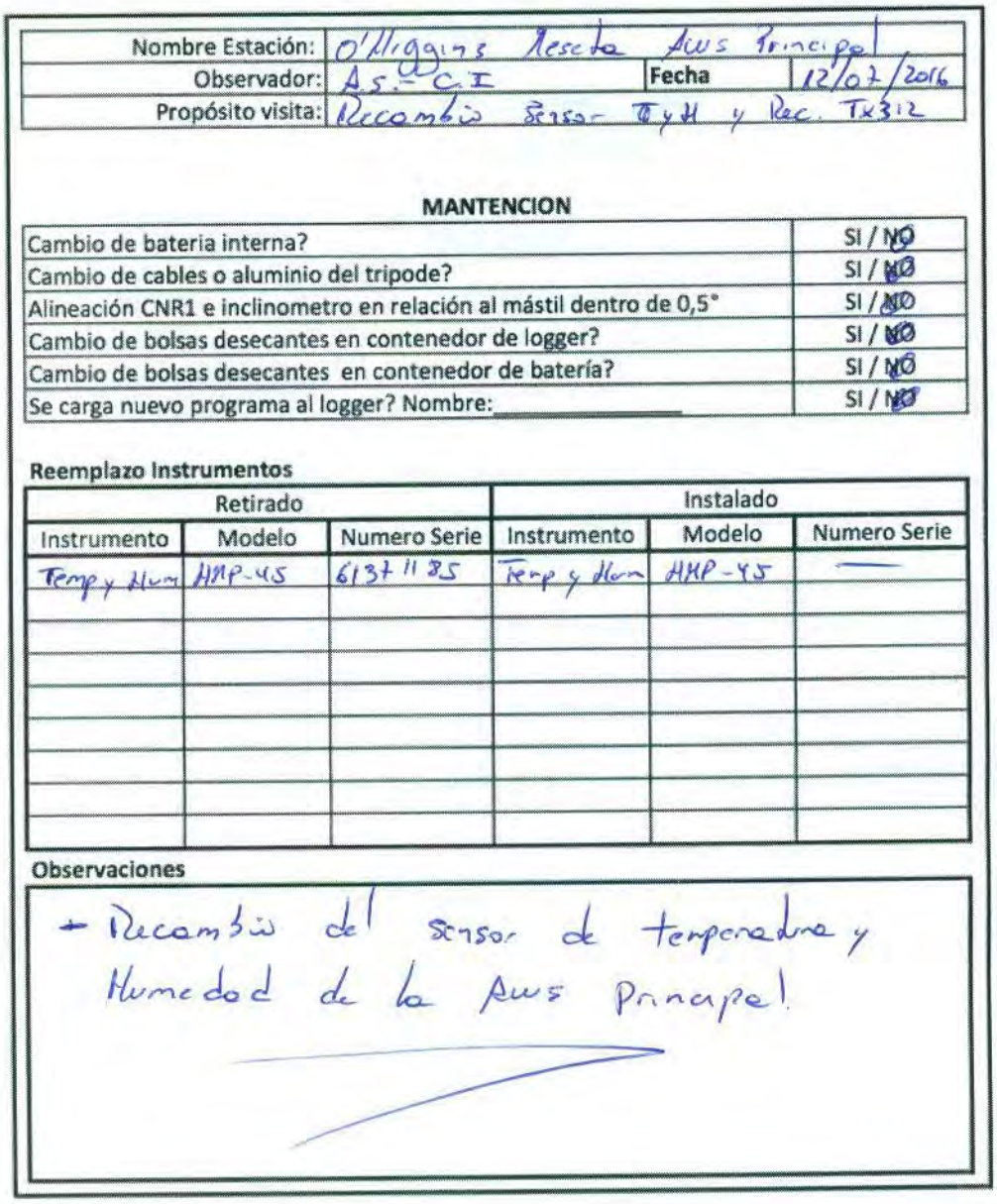
Ajuste hora logger a UTC **(siempre usar horario de verano)**	SI / NO
Descarga de datos y/o cambio tarjeta	SI / NO
Descargar programa del logger al PC	SI / NO
Programa en logger se ejecuta bien	SI / NO

Lecturas

Volt Batt (con tester)	14,35	T_Termistor	10,25	Altura_Agua	—
Volt Batt (logger)	13,17	Long_up_corr	292,02	Offset	—
T_Aire	-1,9	Long_dw_corr	—	Regla_Lm	—
H_Aire	95,005	short_up	-0,881	nuevo Offset	—
T_Aire_Asp	-2,29	short_dw	—	T° Agua	—
H_Aire_Asp	95,88	P_Atm	876,6		
Vel_Viento	11,11	Eje X	—		
Dir_Viento	256,5	Eje Y	—		
Altura Nieve	—				

Fotos tripode, sensores, logger,etc	SI / N	
Inclinación mástil CNR4 (+ si se encuentra inclinado hacia abajo)	—	°
Inclinación mástil principal mirado desde CNR4 (- si es en sentido del reloj)	—	°
Dirección veleta relacionada a norte magnetico	256	* true/magn
CNR4 se encunetra alienado con mastil e inclinómetro? Si no medir	~~Y / N~~	
Altura sensor aspirado (base pagoda)	—	cm
Altura SR50 en AWS	—	cm
Altura SR50 en marco	—	cm
Altura veleta (centro helice)	420	cm

Figura Anexo E.35 Ficha de mantenimiento (parte 1) Estación Meteorológica O'Higgins Meseta Principal.



Nombre Estación:	O'Higgins Meseta Aws Principal		
Observador:	A.S.-C.I	Fecha	12/07/2016
Propósito visita:	Recambio Sensor T y H y Rec. TX312		

MANTENCION

Cambio de bateria interna?	SI / NO
Cambio de cables o aluminio del tripode?	SI / NO
Alineación CNR1 e inclinometro en relación al mástil dentro de 0,5°	SI / NO
Cambio de bolsas desecantes en contenedor de logger?	SI / NO
Cambio de bolsas desecantes en contenedor de batería?	SI / NO
Se carga nuevo programa al logger? Nombre:_____	SI / NO

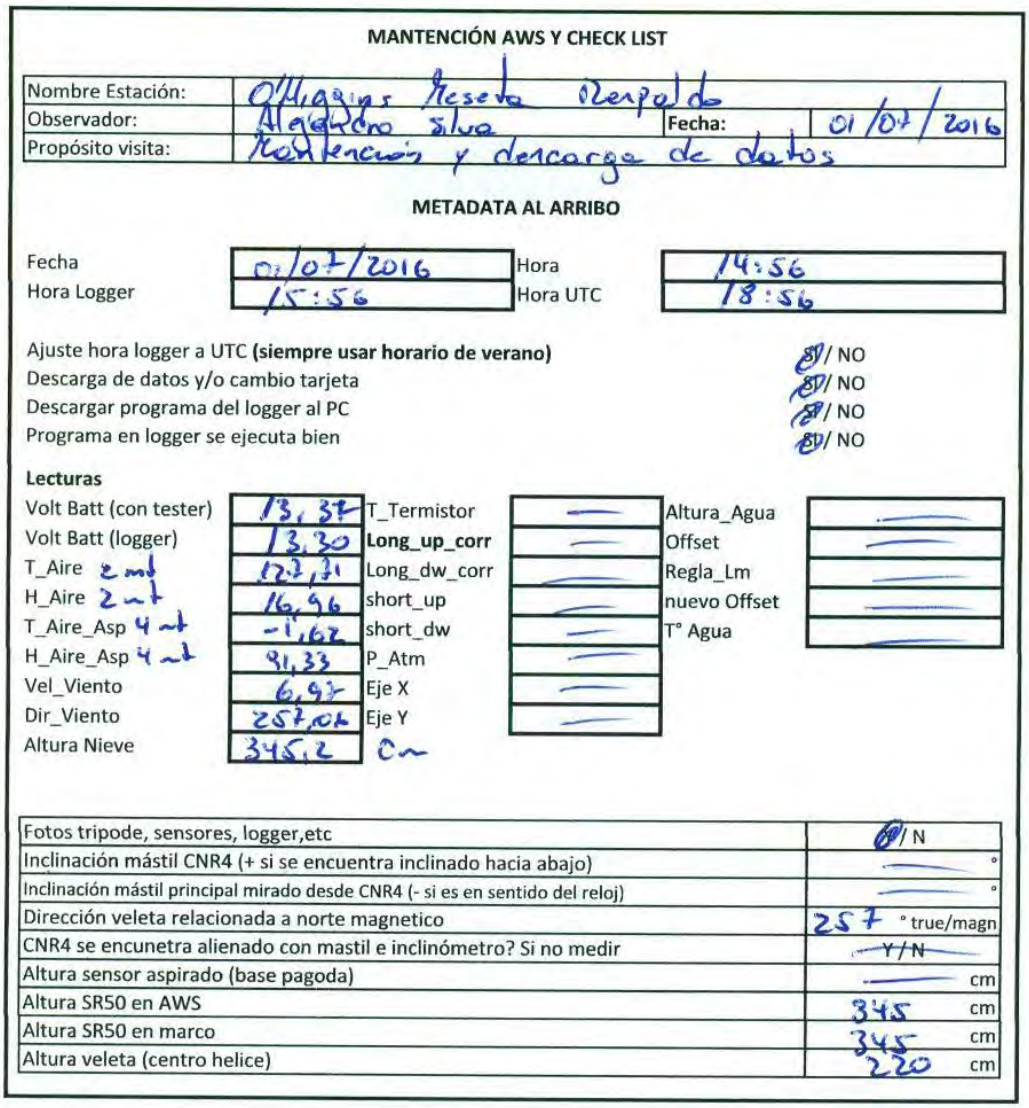
Reemplazo Instrumentos

Retirado			Instalado		
Instrumento	Modelo	Numero Serie	Instrumento	Modelo	Numero Serie
Temp y Hum	HMP-45	6137 1135	Temp y Hum	HMP-45	—

Observaciones

+ Recambio del sensor de temperatura y Humedad de la Aws Principal

Figura Anexo E.36 Ficha de mantenimiento (parte 2) Estación Meteorológica O'Higgins Meseta Principal.



MANTENCIÓN AWS Y CHECK LIST

Nombre Estación:	O'Higgins Meseta Respaldo		
Observador:	Alejandro Silva	Fecha:	01/07/2016
Propósito visita:	Mantención y descarga de datos		

METADATA AL ARRIBO

Fecha	01/07/2016	Hora	14:56
Hora Logger	15:56	Hora UTC	18:56

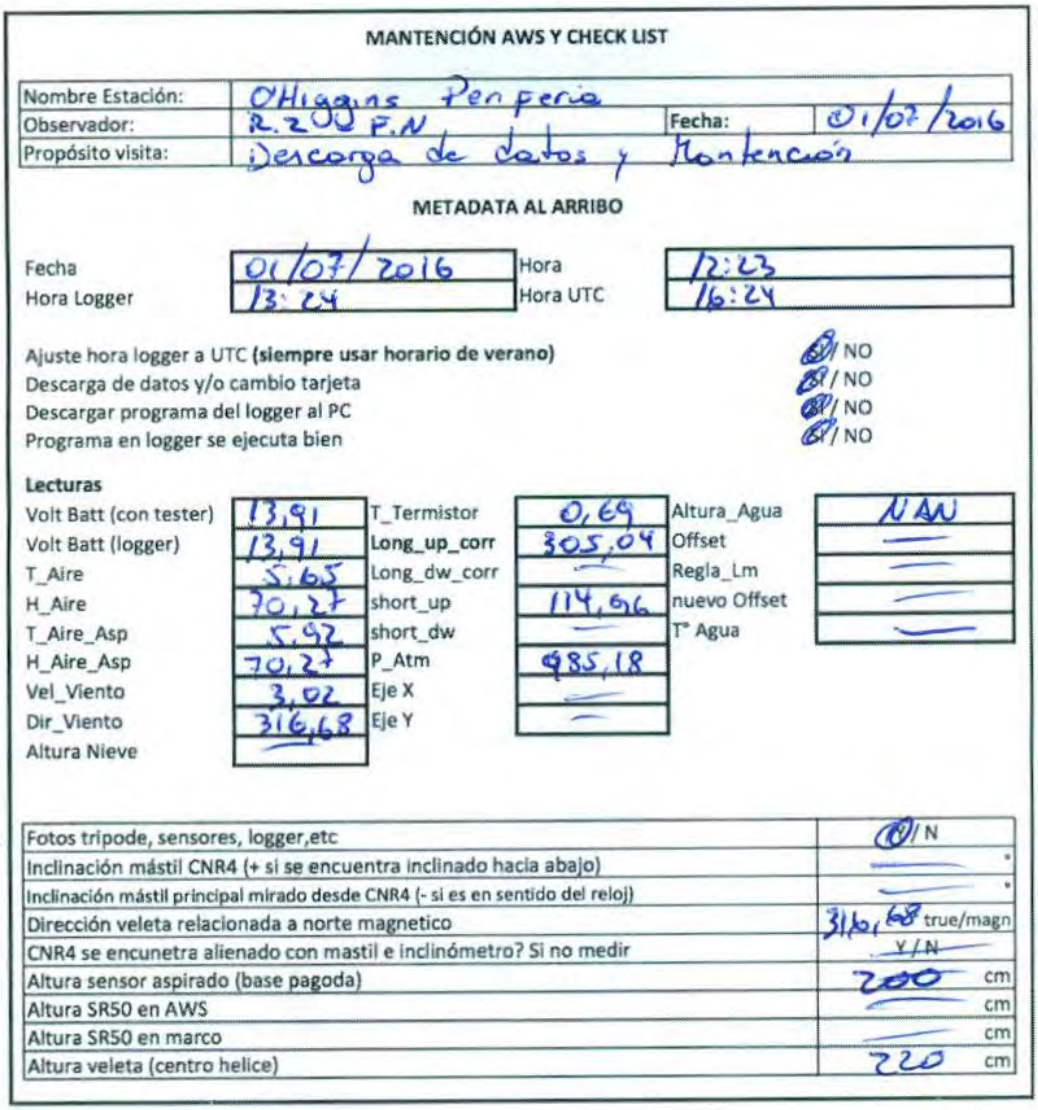
Ajuste hora logger a UTC **(siempre usar horario de verano)**	SI/ NO
Descarga de datos y/o cambio tarjeta	SI/ NO
Descargar programa del logger al PC	SI/ NO
Programa en logger se ejecuta bien	SI/ NO

Lecturas

Volt Batt (con tester)	13,37	T_Termistor	—	Altura_Agua	—
Volt Batt (logger)	13,30	**Long_up_corr**	—	Offset	—
T_Aire 2 mt	12,71	Long_dw_corr	—	Regla_Lm	—
H_Aire 2 mt	16,96	short_up	—	nuevo Offset	—
T_Aire_Asp 4 mt	-1,62	short_dw	—	T° Agua	—
H_Aire_Asp 4 mt	91,33	P_Atm	—		
Vel_Viento	6,97	Eje X	—		
Dir_Viento	257,04	Eje Y	—		
Altura Nieve	345,2	Cm			

Fotos tripode, sensores, logger,etc	SI/ N
Inclinación mástil CNR4 (+ si se encuentra inclinado hacia abajo)	— °
Inclinación mástil principal mirado desde CNR4 (- si es en sentido del reloj)	— °
Dirección veleta relacionada a norte magnetico	257 ° true/magn
CNR4 se encunetra alienado con mastil e inclinómetro? Si no medir	~~Y/N~~
Altura sensor aspirado (base pagoda)	— cm
Altura SR50 en AWS	345 cm
Altura SR50 en marco	345 cm
Altura veleta (centro helice)	220 cm

Figura Anexo E.37 Ficha de mantenimiento Estación Meteorológica O'Higgins Meseta Respaldo.



MANTENCIÓN AWS Y CHECK LIST

Nombre Estación:	OHiggins Periferia		
Observador:	R.Z.J F.N	Fecha:	01/07/2016
Propósito visita:	Descarga de datos y Mantención		

METADATA AL ARRIBO

Fecha	01/07/2016	Hora	12:23
Hora Logger	13:24	Hora UTC	16:24

Ajuste hora logger a UTC **(siempre usar horario de verano)**	(SI) / NO
Descarga de datos y/o cambio tarjeta	(SI) / NO
Descargar programa del logger al PC	(SI) / NO
Programa en logger se ejecuta bien	(SI) / NO

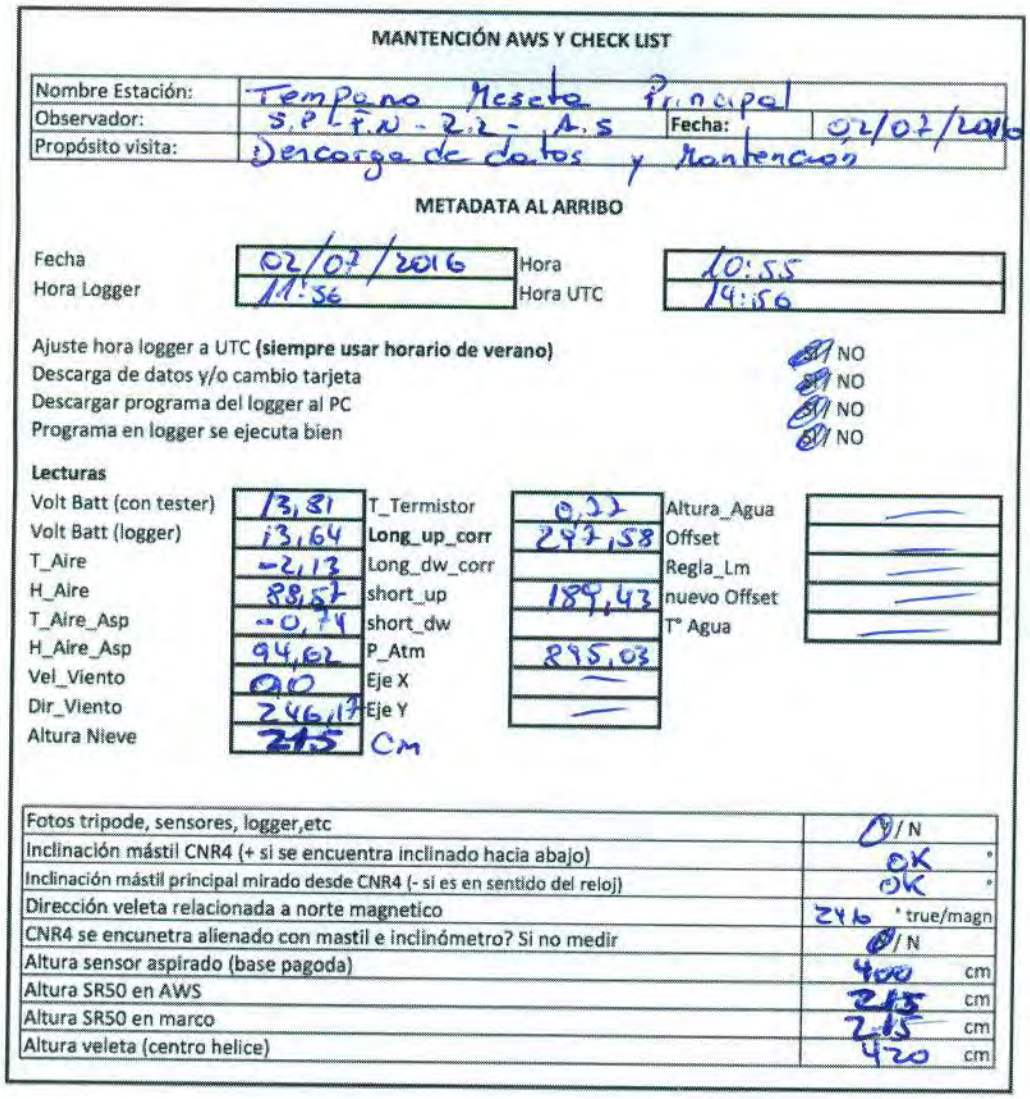
Lecturas

Volt Batt (con tester)	13,91	T_Termistor	0,69	Altura_Agua	NAN
Volt Batt (logger)	13,91	Long_up_corr	305,04	Offset	—
T_Aire	5,65	Long_dw_corr	—	Regla_Lm	—
H_Aire	70,27	short_up	114,96	nuevo Offset	—
T_Aire_Asp	5,92	short_dw	—	T° Agua	—
H_Aire_Asp	70,27	P_Atm	985,18		
Vel_Viento	3,02	Eje X	—		
Dir_Viento	316,68	Eje Y	—		
Altura Nieve	—				

Fotos trípode, sensores, logger,etc	(SI) / N
Inclinación mástil CNR4 (+ si se encuentra inclinado hacia abajo)	— °
Inclinación mástil principal mirado desde CNR4 (- si es en sentido del reloj)	— °
Dirección veleta relacionada a norte magnetico	316,68 true/magn
CNR4 se encunetra alienado con mastil e inclinómetro? Si no medir	Y/N
Altura sensor aspirado (base pagoda)	200 cm
Altura SR50 en AWS	— cm
Altura SR50 en marco	— cm
Altura veleta (centro helice)	220 cm

Figura Anexo E.38 Ficha de mantenimiento Estación Meteorológica O'Higgins Periferia.

E.4.2 Témpano



MANTENCIÓN AWS Y CHECK LIST

Nombre Estación:	Tempano Meseta Principal
Observador:	S.P.F.N - 2.2 - A.S
Fecha:	02/07/2016
Propósito visita:	Descarga de datos y Mantencion

METADATA AL ARRIBO

Fecha	02/07/2016	Hora	10:55
Hora Logger	11:56	Hora UTC	14:56

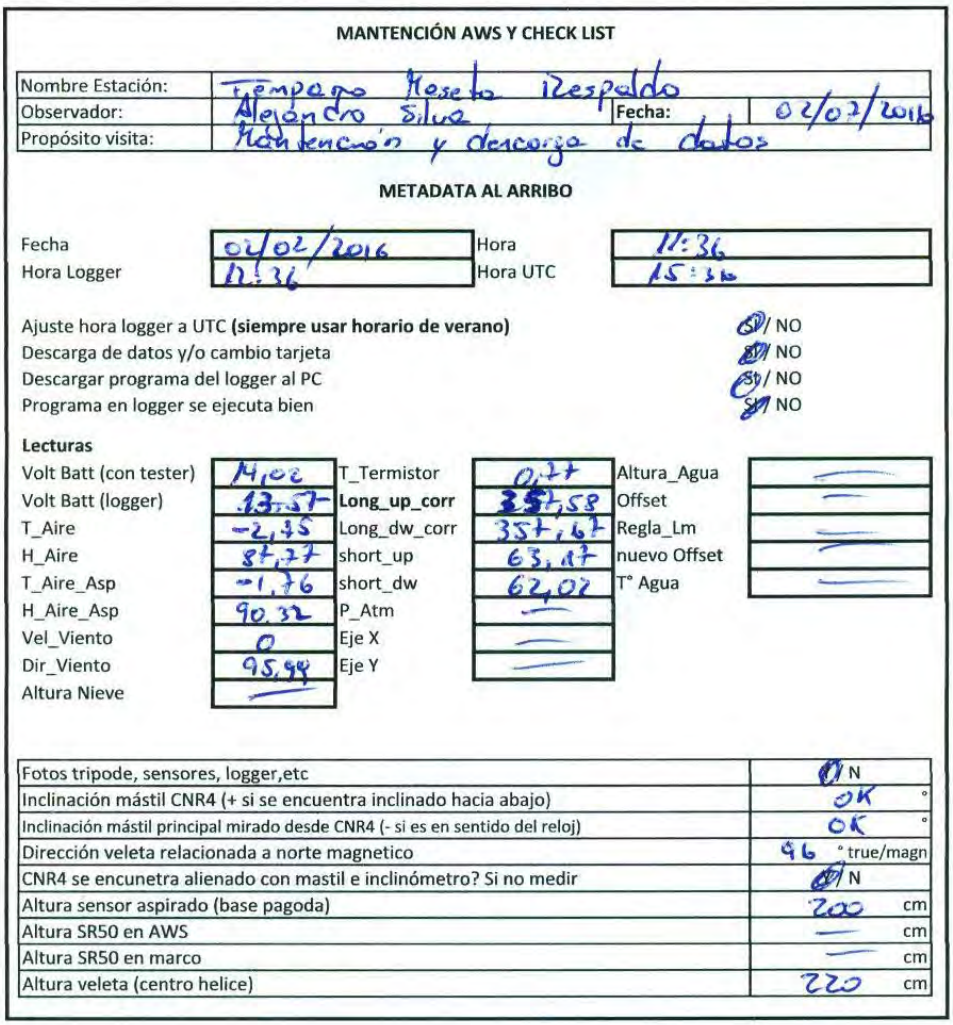
Ajuste hora logger a UTC **(siempre usar horario de verano)**	NO
Descarga de datos y/o cambio tarjeta	NO
Descargar programa del logger al PC	NO
Programa en logger se ejecuta bien	NO

Lecturas

Volt Batt (con tester)	13,81	T_Termistor	0,22	Altura_Agua	—
Volt Batt (logger)	13,64	**Long_up_corr**	247,58	Offset	—
T_Aire	-2,13	Long_dw_corr		Regla_Lm	—
H_Aire	88,57	short_up	189,43	nuevo Offset	—
T_Aire_Asp	-0,74	short_dw		T° Agua	—
H_Aire_Asp	94,62	P_Atm	895,03		
Vel_Viento	0,0	Eje X	—		
Dir_Viento	246,17	Eje Y	—		
Altura Nieve	215	Cm			

Fotos tripode, sensores, logger,etc	Ø / N
Inclinación mástil CNR4 (+ si se encuentra inclinado hacia abajo)	OK °
Inclinación mástil principal mirado desde CNR4 (- si es en sentido del reloj)	OK °
Dirección veleta relacionada a norte magnetico	246 ° true/magn
CNR4 se encunetra alienado con mastil e inclinómetro? Si no medir	Ø / N
Altura sensor aspirado (base pagoda)	400 cm
Altura SR50 en AWS	215 cm
Altura SR50 en marco	215 cm
Altura veleta (centro helice)	420 cm

Figura Anexo E.39 Ficha de mantenimiento Estación Meteorológica Témpano Meseta Principal.



MANTENCIÓN AWS Y CHECK LIST

Nombre Estación:	Témpano Meseta Respaldo		
Observador:	Alejandro Silva	Fecha:	02/02/2016
Propósito visita:	Mantención y descarga de datos		

METADATA AL ARRIBO

Fecha	02/02/2016	Hora	11:36
Hora Logger	12:36	Hora UTC	15:36

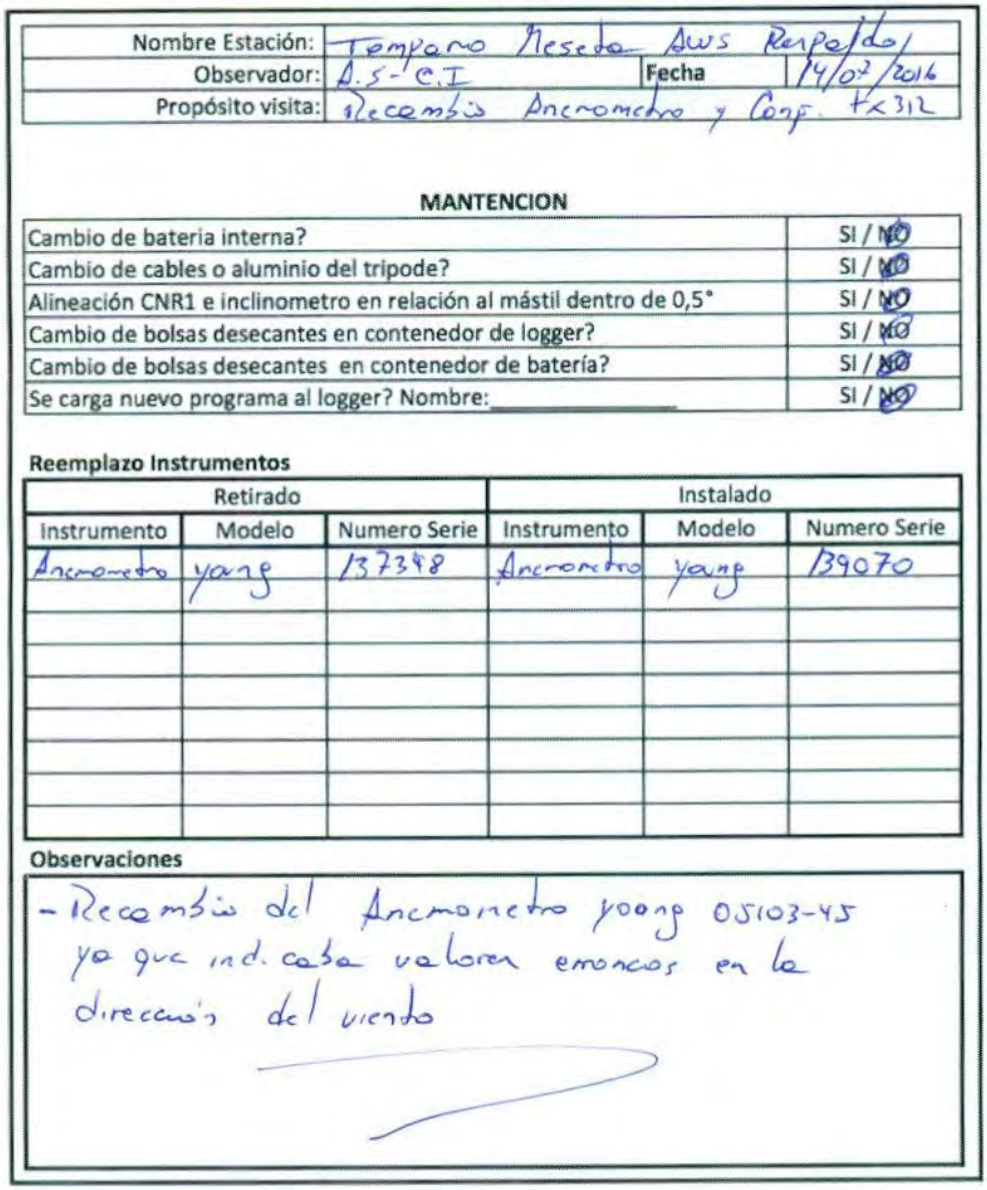
Ajuste hora logger a UTC **(siempre usar horario de verano)**	SI / NO
Descarga de datos y/o cambio tarjeta	SI / NO
Descargar programa del logger al PC	SI / NO
Programa en logger se ejecuta bien	SI / NO

Lecturas

Volt Batt (con tester)	14,02	T_Termistor	0,27	Altura_Agua	—
Volt Batt (logger)	13,57	**Long_up_corr**	357,58	Offset	—
T_Aire	-2,45	Long_dw_corr	357,67	Regla_Lm	—
H_Aire	87,27	short_up	63,17	nuevo Offset	—
T_Aire_Asp	-1,76	short_dw	62,02	T° Agua	—
H_Aire_Asp	90,32	P_Atm	—		
Vel_Viento	0	Eje X	—		
Dir_Viento	95,99	Eje Y	—		
Altura Nieve	—				

Fotos tripode, sensores, logger,etc	N	
Inclinación mástil CNR4 (+ si se encuentra inclinado hacia abajo)	OK	°
Inclinación mástil principal mirado desde CNR4 (- si es en sentido del reloj)	OK	°
Dirección veleta relacionada a norte magnetico	96	° true/magn
CNR4 se encunetra alienado con mastil e inclinómetro? Si no medir	N	
Altura sensor aspirado (base pagoda)	200	cm
Altura SR50 en AWS	—	cm
Altura SR50 en marco	—	cm
Altura veleta (centro helice)	220	cm

Figura Anexo E.40 Ficha de mantenimiento (parte1) Estación Meteorológica Témpano Meseta Respaldo.



Nombre Estación:	Tempano Meseta AWS Respaldo		
Observador:	A.S - C.I	Fecha	14/07/2016
Propósito visita:	Recambio Anemometro y Conf. tx312		

MANTENCION

Cambio de batería interna?	SI / NO
Cambio de cables o aluminio del tripode?	SI / NO
Alineación CNR1 e inclinometro en relación al mástil dentro de 0,5°	SI / NO
Cambio de bolsas desecantes en contenedor de logger?	SI / NO
Cambio de bolsas desecantes en contenedor de batería?	SI / NO
Se carga nuevo programa al logger? Nombre:_____	SI / NO

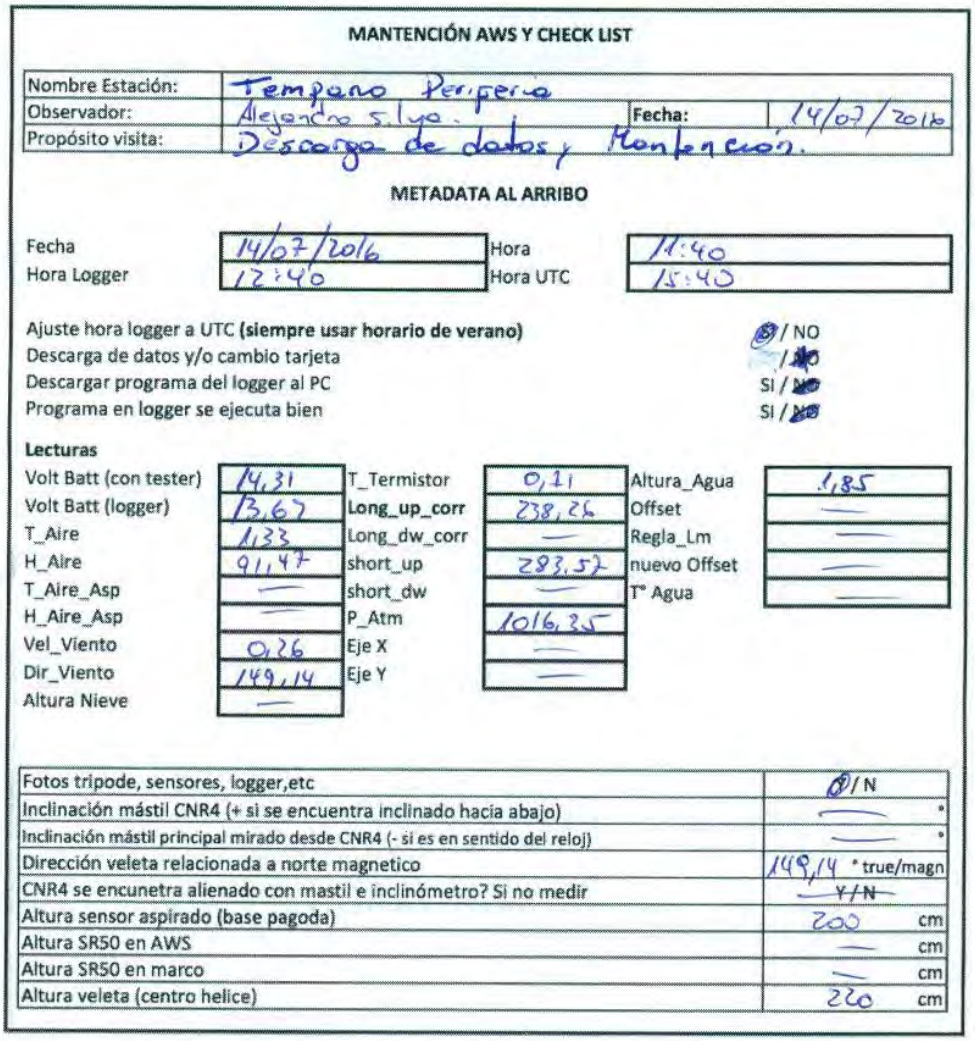
Reemplazo Instrumentos

Retirado			Instalado		
Instrumento	Modelo	Numero Serie	Instrumento	Modelo	Numero Serie
Anemometro	yong	137348	Anemometro	young	139070

Observaciones

- Recambio del Anemometro young 05103-45 ya que ind. caba valores erroneos en la direccion del viento

Figura Anexo E.41 Ficha de mantenimiento (parte 2) Estación Meteorológica Témpano Meseta Respaldo.



MANTENCIÓN AWS Y CHECK LIST

Nombre Estación:	Tempano Periferia		
Observador:	Alejandro S. Lyo.	Fecha:	14/07/2016
Propósito visita:	Descarga de datos y Mantención.		

METADATA AL ARRIBO

Fecha	14/07/2016	Hora	11:40
Hora Logger	12:40	Hora UTC	15:40

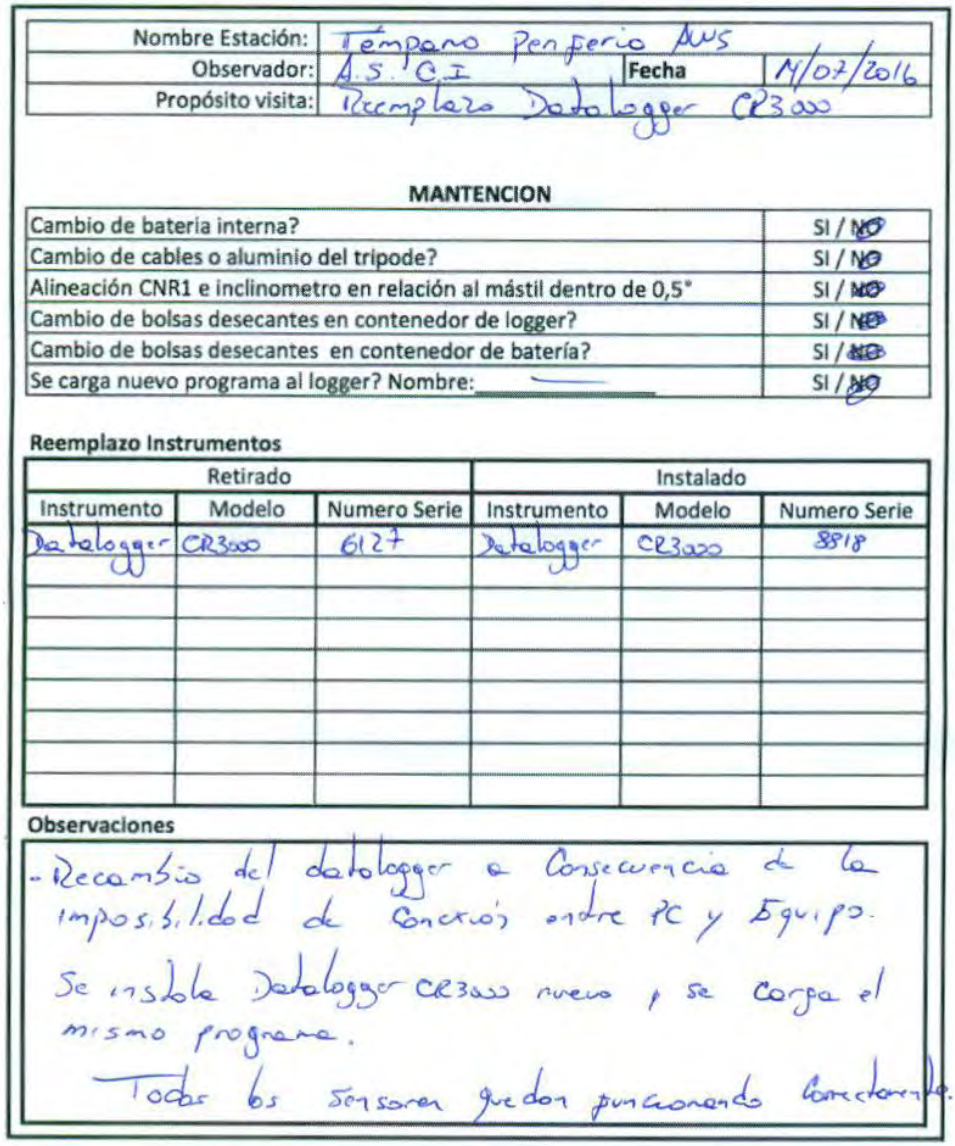
Ajuste hora logger a UTC **(siempre usar horario de verano)**	SI / NO
Descarga de datos y/o cambio tarjeta	/
Descargar programa del logger al PC	SI /
Programa en logger se ejecuta bien	SI /

Lecturas

Volt Batt (con tester)	14,31	T_Termistor	0,11	Altura_Agua	1,85
Volt Batt (logger)	13,67	Long_up_corr	238,26	Offset	—
T_Aire	1,33	Long_dw_corr	—	Regla_Lm	—
H_Aire	91,47	short_up	283,57	nuevo Offset	—
T_Aire_Asp	—	short_dw	—	T° Agua	—
H_Aire_Asp	—	P_Atm	1016,35		
Vel_Viento	0,26	Eje X	—		
Dir_Viento	149,14	Eje Y	—		
Altura Nieve	—				

Fotos tripode, sensores, logger,etc	SI / N	
Inclinación mástil CNR4 (+ si se encuentra inclinado hacia abajo)	—	°
Inclinación mástil principal mirado desde CNR4 (- si es en sentido del reloj)	—	°
Dirección veleta relacionada a norte magnetico	149,14	° true/magn
CNR4 se encunetra alienado con mastil e inclinómetro? Si no medir	~~Y / N~~	
Altura sensor aspirado (base pagoda)	200	cm
Altura SR50 en AWS	—	cm
Altura SR50 en marco	—	cm
Altura veleta (centro helice)	220	cm

Figura Anexo E.42 Ficha de mantenimiento (parte1) Estación Meteorológica Témpano Periferia.



Nombre Estación:	Témpano Periferia AWS		
Observador:	A.S. C.I	Fecha	11/07/2016
Propósito visita:	Reemplazo Datalogger CR3000		

MANTENCION

Cambio de batería interna?	SI / NO
Cambio de cables o aluminio del trípode?	SI / NO
Alineación CNR1 e inclinometro en relación al mástil dentro de 0,5°	SI / NO
Cambio de bolsas desecantes en contenedor de logger?	SI / NO
Cambio de bolsas desecantes en contenedor de batería?	SI / NO
Se carga nuevo programa al logger? Nombre: ____	SI / NO

Reemplazo Instrumentos

Retirado			Instalado		
Instrumento	Modelo	Numero Serie	Instrumento	Modelo	Numero Serie
Datalogger	CR3000	6127	Datalogger	CR3000	8818

Observaciones

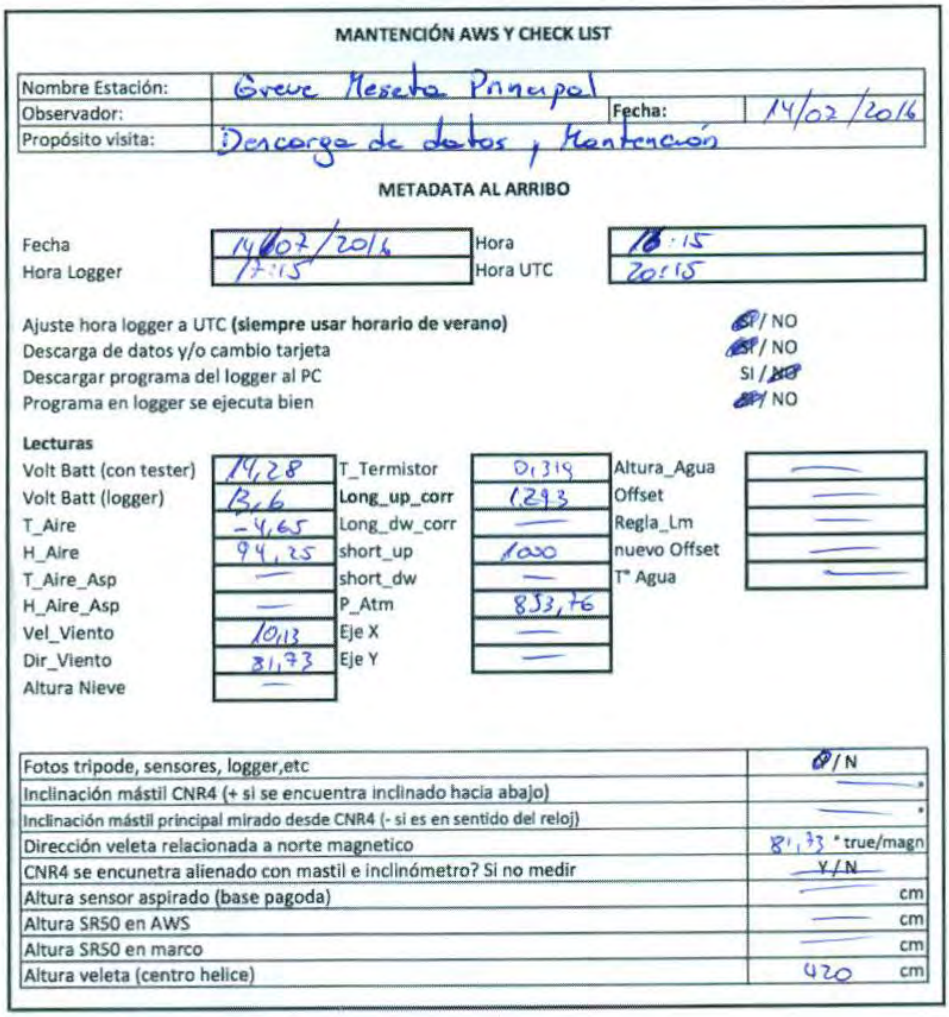
- Recambio del datalogger a Consecuencia de la imposibilidad de Conexión entre PC y Equipo.

Se instala Datalogger CR3000 nuevo y se carga el mismo programa.

Todos los Sensores quedan funcionando Correctamente.

Figura Anexo E.43 Ficha de mantenimiento (parte 2) Estación Meteorológica Témpano Periferia.

E.4.3 Greve



MANTENCIÓN AWS Y CHECK LIST

Nombre Estación:	Greve Meseta Principal		
Observador:		Fecha:	14/02/2016
Propósito visita:	Descarga de datos, Mantención		

METADATA AL ARRIBO

Fecha	14/02/2016	Hora	16:15
Hora Logger	17:15	Hora UTC	20:15

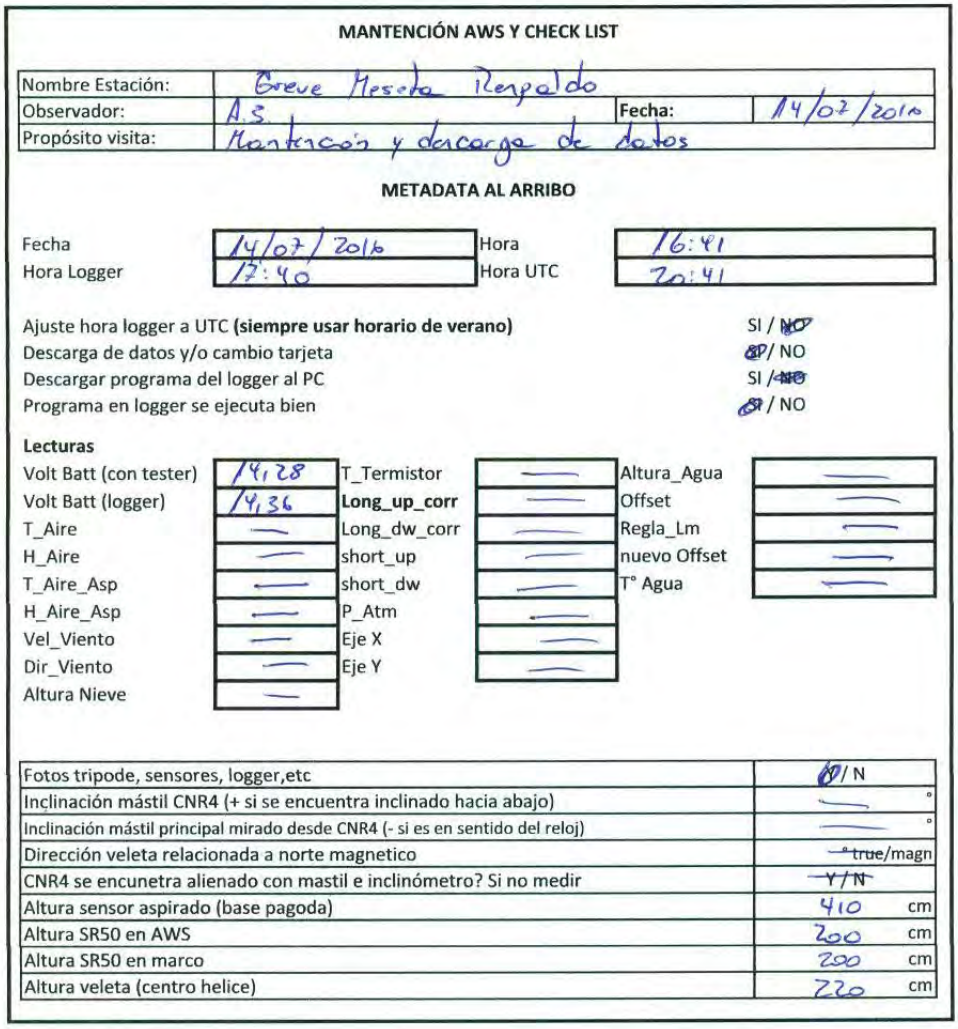
Ajuste hora logger a UTC **(siempre usar horario de verano)**	SI / NO
Descarga de datos y/o cambio tarjeta	SI / NO
Descargar programa del logger al PC	SI / NO
Programa en logger se ejecuta bien	SI / NO

Lecturas

Volt Batt (con tester)	14,28	T_Termistor	0,319	Altura_Agua	—
Volt Batt (logger)	13,6	**Long_up_corr**	1293	Offset	—
T_Aire	-4,65	Long_dw_corr	—	Regla_Lm	—
H_Aire	94,25	short_up	1000	nuevo Offset	—
T_Aire_Asp	—	short_dw	—	T° Agua	—
H_Aire_Asp	—	P_Atm	853,76		
Vel_Viento	10,13	Eje X	—		
Dir_Viento	81,73	Eje Y	—		
Altura Nieve	—				

Fotos tripode, sensores, logger,etc	Y / N
Inclinación mástil CNR4 (+ si se encuentra inclinado hacia abajo)	— °
Inclinación mástil principal mirado desde CNR4 (- si es en sentido del reloj)	— °
Dirección veleta relacionada a norte magnetico	81,73 ° true/magn
CNR4 se encunetra alienado con mastil e inclinómetro? Si no medir	Y / N
Altura sensor aspirado (base pagoda)	— cm
Altura SR50 en AWS	— cm
Altura SR50 en marco	— cm
Altura veleta (centro helice)	420 cm

Figura Anexo E.44 Ficha de mantenimiento Estación Meteorológica Greve Meseta Principal.



MANTENCIÓN AWS Y CHECK LIST

Nombre Estación:	Greve Meseta Respaldo		
Observador:	A.S.	Fecha:	14/07/2016
Propósito visita:	Mantención y descarga de datos		

METADATA AL ARRIBO

Fecha	14/07/2016	Hora	16:41
Hora Logger	17:40	Hora UTC	20:41

Ajuste hora logger a UTC **(siempre usar horario de verano)**	SI / ~~NO~~
Descarga de datos y/o cambio tarjeta	SI / NO
Descargar programa del logger al PC	SI / ~~NO~~
Programa en logger se ejecuta bien	SI / NO

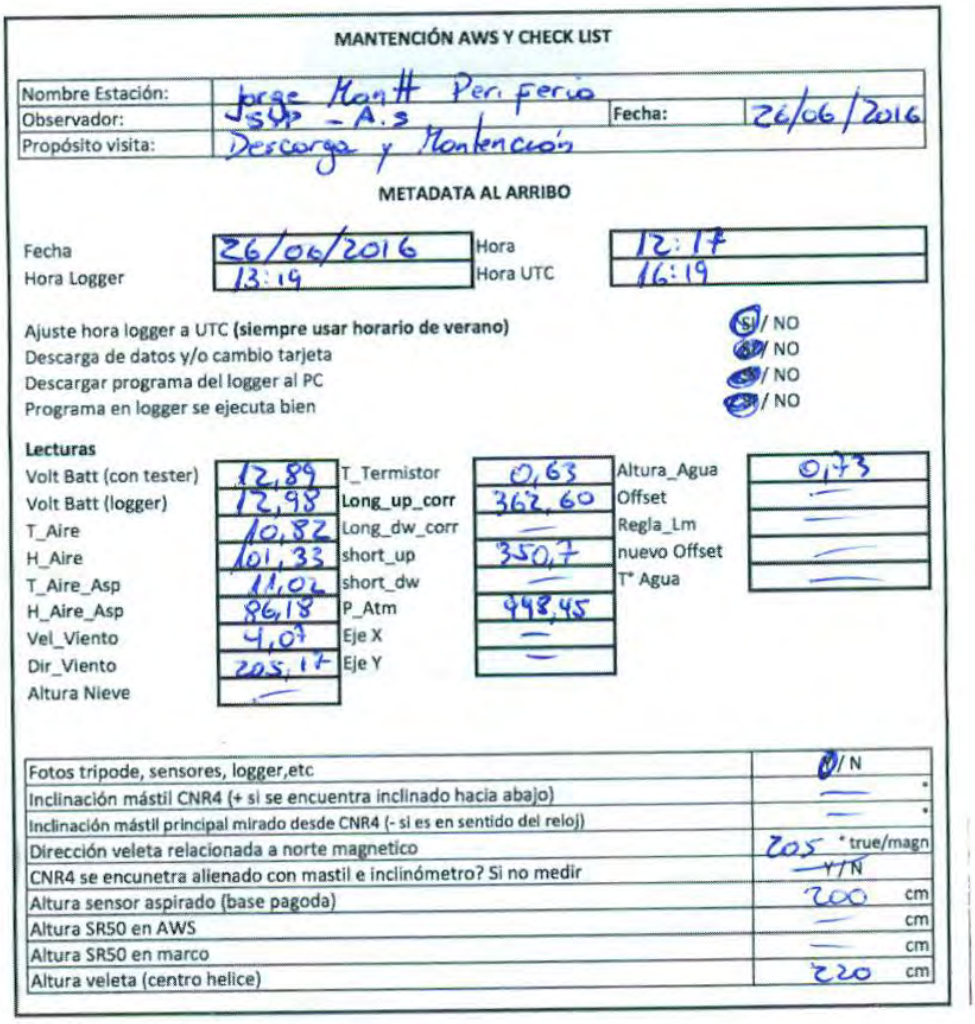
Lecturas

Volt Batt (con tester)	14,28	T_Termistor	—	Altura_Agua	—
Volt Batt (logger)	14,36	**Long_up_corr**	—	Offset	—
T_Aire	—	Long_dw_corr	—	Regla_Lm	—
H_Aire	—	short_up	—	nuevo Offset	—
T_Aire_Asp	—	short_dw	—	T° Agua	—
H_Aire_Asp	—	P_Atm	—		
Vel_Viento	—	Eje X	—		
Dir_Viento	—	Eje Y	—		
Altura Nieve	—				

Fotos tripode, sensores, logger,etc	SI / N	
Inclinación mástil CNR4 (+ si se encuentra inclinado hacia abajo)	—	°
Inclinación mástil principal mirado desde CNR4 (- si es en sentido del reloj)	—	°
Dirección veleta relacionada a norte magnetico	~~°true/magn~~	
CNR4 se encunetra alienado con mastil e inclinómetro? Si no medir	~~Y / N~~	
Altura sensor aspirado (base pagoda)	410	cm
Altura SR50 en AWS	200	cm
Altura SR50 en marco	200	cm
Altura veleta (centro helice)	220	cm

Figura Anexo E.45 Ficha de mantenimiento Estación Meteorológica Greve Meseta Respaldo.

E.4.4 Jorge Montt



MANTENCIÓN AWS Y CHECK LIST

Nombre Estación:	Jorge Montt Periferia		
Observador:	JSAP - A.S	Fecha:	26/06/2016
Propósito visita:	Descarga y Mantención		

METADATA AL ARRIBO

Fecha	26/06/2016	Hora	12:17
Hora Logger	13:19	Hora UTC	16:19

Ajuste hora logger a UTC **(siempre usar horario de verano)**	SI / NO
Descarga de datos y/o cambio tarjeta	SI / NO
Descargar programa del logger al PC	SI / NO
Programa en logger se ejecuta bien	SI / NO

Lecturas

Volt Batt (con tester)	12,89	T_Termistor	0,63	Altura_Agua	0,73
Volt Batt (logger)	12,98	**Long_up_corr**	362,60	Offset	—
T_Aire	10,82	Long_dw_corr	—	Regla_Lm	—
H_Aire	101,33	short_up	350,7	nuevo Offset	—
T_Aire_Asp	11,02	short_dw	—	T° Agua	—
H_Aire_Asp	86,18	P_Atm	948,45		
Vel_Viento	4,07	Eje X	—		
Dir_Viento	205,17	Eje Y	—		
Altura Nieve	—				

Fotos trípode, sensores, logger,etc	SI / N
Inclinación mástil CNR4 (+ si se encuentra inclinado hacia abajo)	— °
Inclinación mástil principal mirado desde CNR4 (- si es en sentido del reloj)	— °
Dirección veleta relacionada a norte magnetico	205 ° true/magn
CNR4 se encunetra alienado con mastil e inclinómetro? Si no medir	~~Y~~/N
Altura sensor aspirado (base pagoda)	200 cm
Altura SR50 en AWS	— cm
Altura SR50 en marco	— cm
Altura veleta (centro helice)	220 cm

Figura Anexo E.46 Ficha de mantenimiento Estación Meteorológica Jorge Montt.

Anexo F *Motos de nieve*

F.1 Detalle del procedimiento para traslado en moto de nieve

Una variedad de motos tienen las características suficientes para su uso en travesía, sin embargo antes de que puedan ser utilizados con tal configuración, es necesario realizar algunas modificaciones. La más importante de ellas es la instalación de un aro (cable metálico) que une el punto de remolque trasero a través de la moto de nieve al parachoques delantero (Figura Anexo F.1).



Figura Anexo F.1 Sujeción mediante cable metálico.

Este mismo refuerzo permite unir a las motos de nieve entre ella como una cadena continua para asegurar los desplazamientos en el glaciar. Grilletes o maillones de acero se utilizan para unirla cuerda de enlace a la parte delantera y trasera de la moto de nieve (Figura Anexo F.2).



Figura Anexo F.2 Manillón de acero uniendo cuerda, aro de alambre y moto. (a) Parachoques delantero y (b) Punto de remolque trasero.

Todas las motos de nieve utilizadas fueron equipadas con un cable que permita unir al piloto con la llave de contacto de manera talque si se separa de su vehículo, el motor se detenga de manera inmediata.

F.2 Trineos

Las cargas llevadas a bordo de los trineos, fue asegurada mediante cuerdas estáticas de aproximadamente 6 mm de diámetro, con el fin de disminuir la cantidad de movimiento interno. El amarre y sujeción de la carga es particularmente importante en caso de un trineo enganchado a la última moto del convoy.

Al viajar con un solo trineo, es recomendable fijarlo a la moto trasera. Si es necesario un segundo trineo, se amara a la cuerda de unión, unos 10 metros detrás de la moto delantera, con el fin de proporcionar una mayor seguridad y un mejor control.

Las cuerdas que unen las motos, están hechas de un nylon dinámico de ¾ pulgadas (18mm). Una sección de 1.5 metros de manguera de goma de 14 ½ pulgadas es fijada en cada extremo de la cuerda, en contacto con la respectiva moto (Figura Anexo F.3).

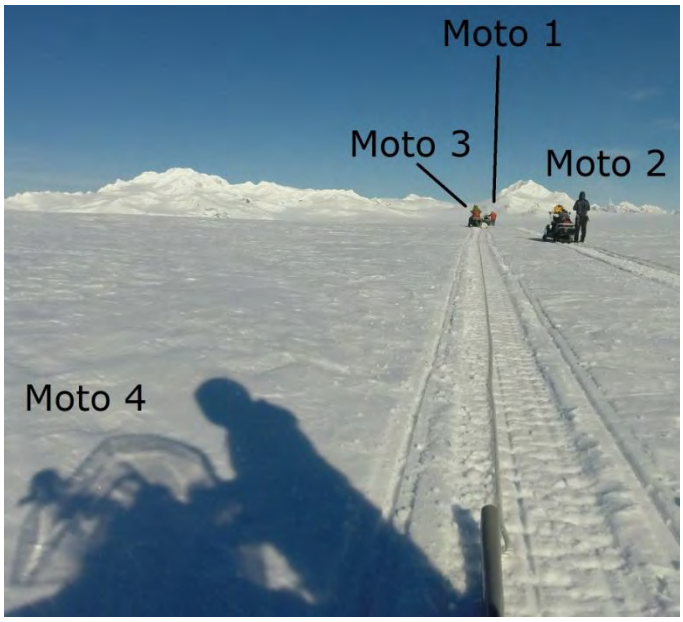


Figura Anexo F.3 Configuración de las cuatro motos en pares durante la travesía (vista desde la última moto).

Esta manguera protege la sección de la cuerda que podría ser dañada por los patines o la oruga de las motos. Además, esta instalación permite aumentar el control de la cuerda por el piloto cuando se conduce. El trineo se amara a la cuerda mediante un bucle tipo *Prusik* usando el nudo *Klemheist*, uno en la parte frontal para arrastrar el trineo, el otro en la parte trasera para mantenerlo en su lugar.

La cuerda de enlace se fija con un maillón oval a la barra de remolque de la moto delantera y con un grillete D o maillón en forma de pera al parachoques de la moto trasera.

F.3Frenos

Un sistema de frenos mediante cuerdas puede ser empleado en los trineos. El método, dependiendo del tipo de trineo, se basa en la instalación de cuerdas en su base en las secciones cuesta abajo de la travesía con el fin de aumentar la fricción con la nieve y reducir la velocidad. La moto trasera en la cordada es esencial para ayudar a controlar el manejo de los trineos durante la travesía.

F.4Amarra del piloto

El piloto debe estar conectado a su moto mediante una cuerda dinámica de 4 metros de largo. Esta se encuentra atada a la sección trasera de la moto mediante un maillón y al arnés del piloto. La cuerda debe estar amarrada al respaldo del asiento usando una sujeción elástica, permitiendo su despliegue en caso de caída (Figura Anexo F.4). El largo de la cuerda y su despliegue debe disminuir el riesgo de choque entre el piloto y su moto.



Figura Anexo F.4 Detalle: cuerda de sujeción del piloto a la moto.

F.5Manejo en cordada

Se requiere una buena coordinación entre los dos pilotos de la cordada durante la travesía. El piloto de la moto trasera tiene el rol de guardar la cuerda de unión tensada y evitar pisarla. El piloto de cabeza, debe estar atento, al mismo tiempo, de lo que ocurre tanto delante como detrás de él.

Una comunicación segura y eficiente es esencial en la cordada, con un sistema simple de señales. El piloto de cabeza debe indicar cuándo acelerar, frenar o detener la travesía. El piloto de la moto trasera puede captar la atención del piloto de cabeza disminuyendo la velocidad y tensando la cuerda. Todo lo anterior sin perjuicio del sistema de comunicación radial dispuesto y utilizado durante la travesía.

F.6 Terreno agreste

La presencia de nieve fresca y blanda puede complicar los movimientos en motos, incluso con poco peso. El uso intensivo del acelerador o de la marcha trasera causara el empantanamiento de la moto. Es recomendable hacer desplazamientos suaves y reducir los momentos de detención.

En zona de potenciales grietas, inspección a pie y encordado a la moto puede ser necesario. Como complemento al GPS, el uso de banderas (Figura Anexo F.5) para marcar rutas seguras puede ser útil en el caso que la visibilidad se reduzca o que la huella desaparezca por viento. Si es posible, la travesía debe realizarse perpendicular a las grietas.



Figura Anexo F.5 Bandera marcando la ruta segura de travesía.

En zona de grietas, el sistema de unión de la moto funciona mejor con velocidad baja, permitiendo reaccionar de forma más rápida y segura en caso de caídas.

En caso que los pilotos se tengan que reunir, los movimientos a pie entre las motos se deben realizar siempre asegurados a la cuerda de enlace.

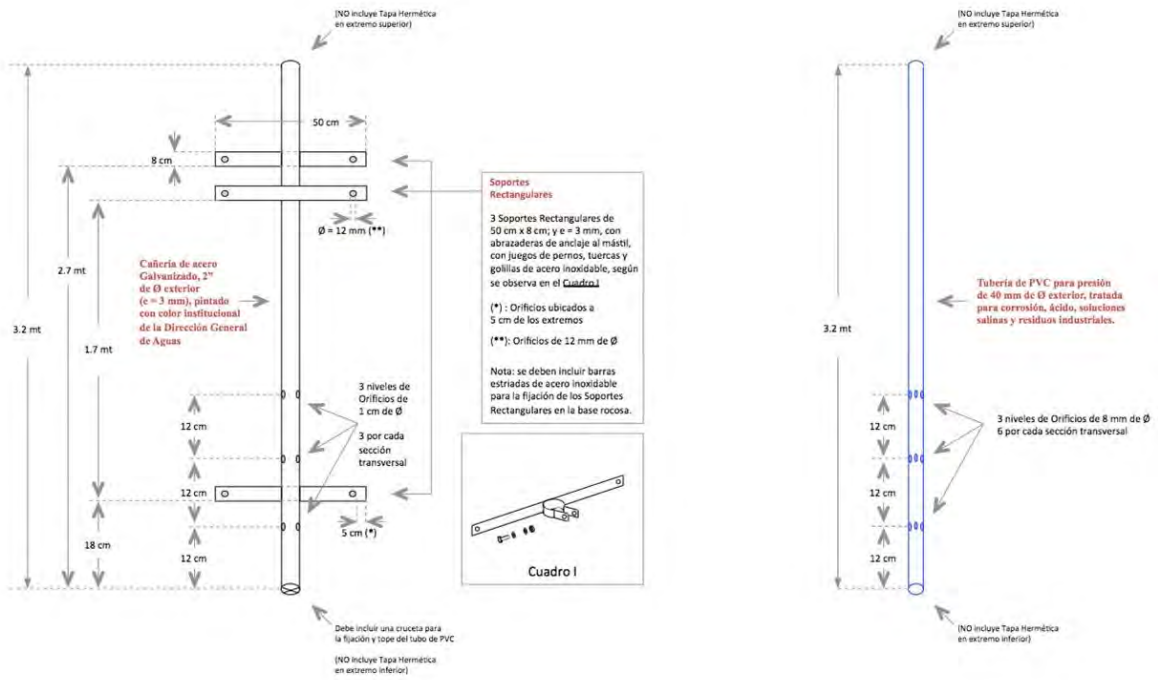


Figura Anexo G.1 Estructura de fijación de los sensores de nivel de agua en las estaciones Glaciar Jorge Montt, Glaciar Témpano y Glaciar O'Higgins.

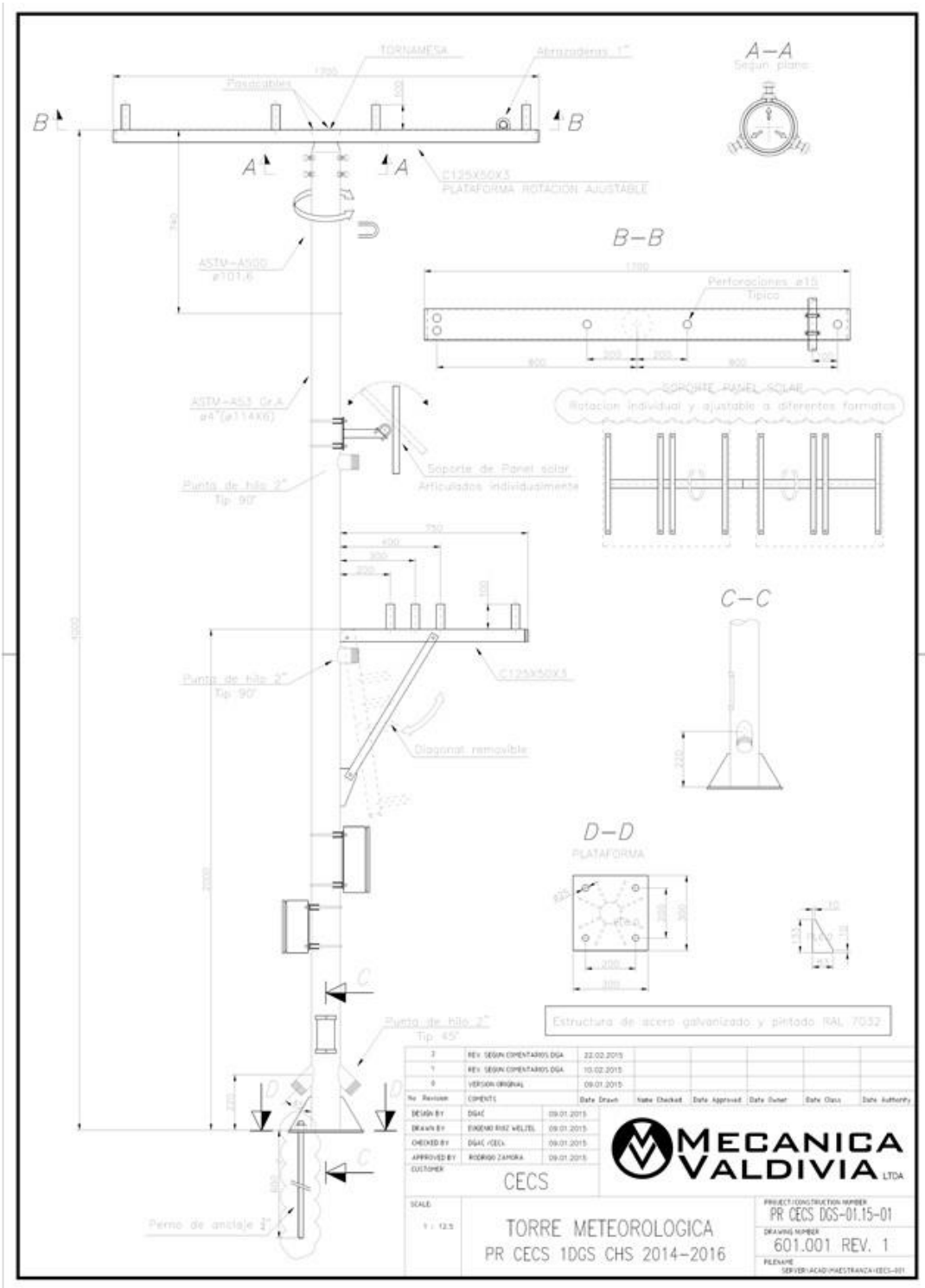


Figura Anexo G.2 Torre de estaciones meteorológicas HS en Glaciar Greve, HS en Glaciar Greve *Nunatak* Occidental y HS en Glaciar O'Higgins.