

GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS
DIRECCION GENERAL DE AGUAS

**ESTIMACIONES DE VOLÚMENES DE HIELO
MEDIANTE SISTEMAS DE RADAR PARA USOS
GLACIOLÓGICOS EN EL NORTE CHICO Y ZONA
CENTRAL DE CHILE Y MEDICIONES
GLACIOLÓGICAS EN EL GLACIAR TYNDALL,
CAMPO DE HIELO SUR**

**REALIZADO POR :
UNIVERSIDAD DE MAGALLANES
DIRECCIÓN DE PROGRAMAS ANTÁRTICOS Y SUBANTÁRTICOS**

S.I.T. N° 168

Punta Arenas, Diciembre 2008

MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS

Ministro de Obras Públicas
Ingeniero Civil Sr. Sergio Bitar C.

Director General de Aguas
Abogado Sr. Rodrigo Weisner L.

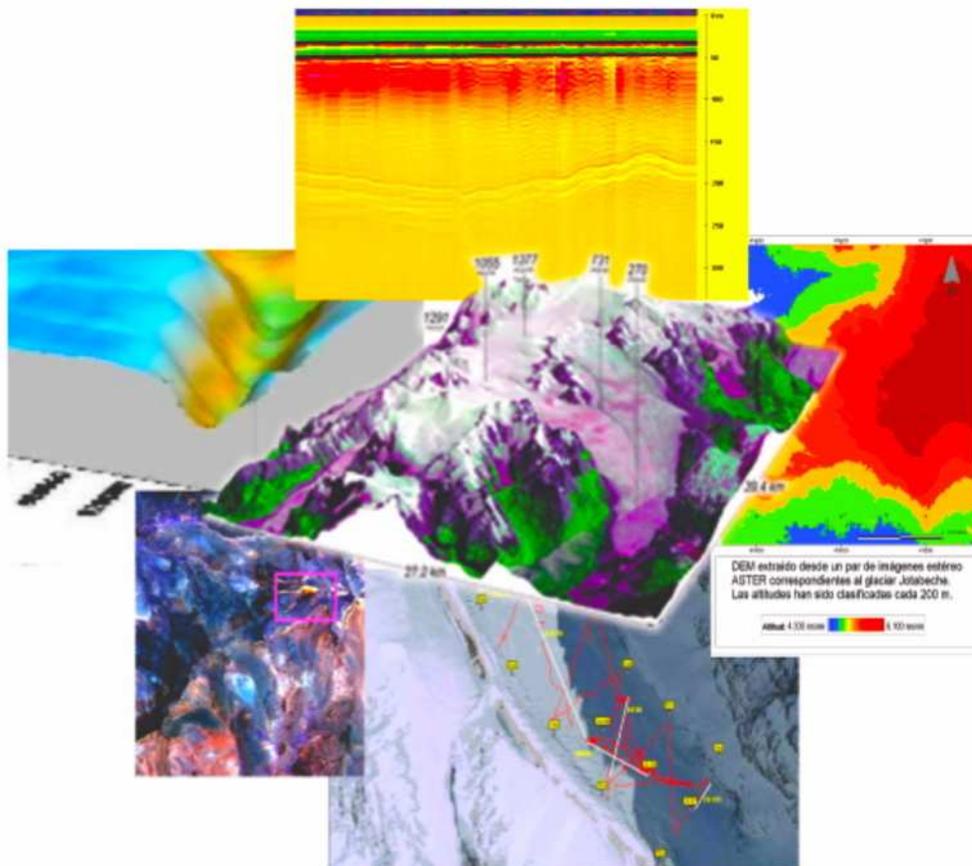
Jefe Unidad de Glaciología y Nieves
Geógrafo Sr. Gonzalo Barcaza S.

Inspector Fiscal
Ingeniero Civil Sr. Fernando Escobar C.

UNIVERSIDAD DE MAGALLANES

Jefe de Proyecto
Dr. -Ing. Carlos Cárdenas Mansilla
Investigador asociado al CEQUA
e-mail: carlos.cardenas@umag.cl

Profesionales:
MSc. Rubén Carvallo Barrientos
Ing. Geodesta, Heiner Lange
Ing. Geodesta Jorge Hernández



Científico responsable del proyecto
Dr. -Ing. Carlos Cárdenas M.
Dirección de Programas Antárticos y Subantárticos
UNIVERSIDAD DE MAGALLANES
Investigador asociado al CEQUA
e-mail: carlos.cardenas@umag.cl
Punta Arenas
Diciembre 2008

MENCIÓN DE RESPONSABILIDAD

Dr. -Ing. Carlos Cárdenas Mansilla
(Director del proyecto, **Radio Echo Sounding, RES**)

MSc. Rubén Carvallo Barrientos
(**Radio Echo Sounding, RES**)

Ing. Geodesta, Heiner Lange
(**Georeferenciación, GPS**)

Ing. Geodesta Jorge Hernández Inostroza
(**Georeferenciación, GPS**)

Índice general

1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	3
2.1. Objetivo general	3
2.2. Objetivos específicos	3
2.2.1. Norte Chico y Zona Central de Chile	3
2.2.2. Mediciones glaciológicas sobre el glaciar Tyndall	4
2.3. Ubicación geográfica de las zonas de estudio	5
2.3.1. Zona Norte Chico, cuenca del río Copiapó, glaciar Jotabeche	5
2.3.2. Zona Central, cuenca del río Aconcagua, glaciar Juncal Norte	6
2.3.3. Zona Sur, cuenca del río Serrano, glaciar Tyndall	7
3. MEDICIONES DE RADIO ECO SONDAJE	8
3.1. Sistema de Radio Eco Sondaje	8
3.2. Radio Eco Sondaje en el Glaciar Jotabeche, Norte Chico	10
3.3. Radio Eco Sondaje en el Glaciar Juncal Norte, Zona Central	15
3.4. Radio Eco Sondaje e instalación de balizas en el Glaciar Tyndall, Campo de Hielo Sur, (CHS)	19

3.5.	Captura y análisis de datos de radar	24
3.5.1.	Cálculo del espesor del hielo	24
4.	GPS - GEORREFERENCIACIÓN	26
4.1.	Descripción del método GPS empleado en el estudio	26
4.2.	Georreferenciación de datos de las campañas de terreno	27
4.2.1.	Instrumental	27
4.2.2.	Metodología y configuración en la recolección de datos	28
4.3.	Sistemas de coordenadas	28
4.4.	Procesamiento de datos	29
4.5.	Velocidad superficial del hielo en el glaciar Juncal Norte	30
4.6.	Precisión de datos GPS	31
4.7.	Presentación de los resultados	31
5.	GENERACIÓN DE LA CARTOGRAFÍA GLACIAR	32
5.1.	Proyección, datum y escalas	32
5.1.1.	Proyección universal, (UTM)	32
5.1.2.	Datum	33
5.1.3.	Escala	33
5.2.	Visualización de puntos	33
5.3.	Superficie y modelo tridimensional	34
5.3.1.	Generación de un TIN	34
5.3.2.	Modelo Tridimensional	35
6.	REPRESENTACIÓN TRIDIMENSIONAL	36

6.1. Selección y justificación del tipo de producto empleado	36
6.1.1. Generación del DEM	38
6.1.2. Elaboración cartográfica	38
6.1.3. Ventajas de un DEM derivado de un par estéreo de imágenes ASTER	39
7. ESTIMACIÓN DE LOS VOLÚMENES DE HIELO EQUIVALENTES EN AGUA	40
7.1. Estimación del volumen de hielo del glaciar Jotabeche	40
7.2. Estimación del volumen de hielo en un sector del glaciar Juncal Norte	42
7.3. Estimación del volumen de hielo de un sector del glaciar Tyndall	45
8. TRABAJO AUDIOVISUAL	49
8.1. Programa audiovisual Pilares del Agua	49
9. CONCLUSIONES.	51
10.RECOMENDACIONES	54
A. Grupo de trabajo	59
B. Recopilación de antecedentes y análisis de resultados previos	61
B.1. Análisis de trabajos y mediciones mediante RES en zona del glaciar Jotabeche	61
B.2. Análisis de trabajos y mediciones mediante RES en la zona del glaciar Juncal Norte	61
B.3. Análisis de trabajos y mediciones mediante RES en zona del glaciar Tyndall	62
C. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES E INGRESO A LAS ZONAS DE ESTUDIO	64
C.1. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES	64

C.1.1. Cronograma de actividades,Glaciar Jotabeche	64
C.1.2. Cronograma de actividades, Glaciar Juncal Norte	66
C.1.3. Cronograma de actividades,Glaciar Tyndall	67
C.2. INGRESO A LAS ZONAS DE ESTUDIO	68
C.2.1. Ingreso a la zona del glaciar Jotabeche	68
C.2.2. Ingreso a la zona del glaciar Juncal Norte	70
C.2.3. Ingreso a la zona del glaciar Tyndall	72
D. PERFILES DE RADAR	76
D.1. Perfiles de radar obtenidos en el glaciar Tyndall	77
D.2. Perfiles de radar obtenidos en el glaciar Jotabeche	81
D.3. Radargrama obtenido en la zona del glaciar Juncal Norte	82
E. RUTAS GEORREFERENCIADAS	89
E.1. Glaciar Jotabeche	90
E.2. Glaciar Juncal Norte	91
E.3. Glaciar Tyndall	92
F. REPRESENTACIÓN CARTOGRÁFICA	93
G. REPRESENTACIÓN TRIDIMENCIONAL (DEM)	94
H. MATERIAL AUDIOVISUAL	95

Índice de figuras

2.1. Ubicación geográfica del glaciar Jotabeche sobre la cuenca del río Copiapó	5
2.2. Ubicación geográfica del glaciar Juncal Norte sobre la cuenca del río Aconcagua	6
2.3. Ubicación geográfica del glaciar Tyndall, cuenca del río Serrano.	7
3.1. Sistema de radar de impulso.	9
3.2. Personal de la Universidad de Magallanes sobre el glaciar Grey, Parque Nacional Torres del Paine realizando mediciones mediante el sistema de radar de impulso (1998).	10
3.3. Ruta utilizada para acceder al glaciar Jotabeche ubicado a 5200 m.s.n.m.	11
3.4. Borde del glaciar Jotabeche a una altura aproximada de 5200 m.s.n.m., pendiente del glaciar en la zona baja (Aprox. 50° de inclinación) . Inspección de la zona central del glaciar donde se realizaron las mediciones.	12
3.5. Sistema de radar desplegado sobre la zona central del glaciar Jotabeche, donde se realizaron las mediciones.	12
3.6. Ubicación de la estación GPS fija utilizada en la campaña al glaciar Jotabeche a una altura de 4800 m.s.n.m. la cual será utilizada para el procesamiento de datos en forma diferencial	13
3.7. Traza en formato tipo A capturada en la zona central del glaciar Jotabeche a 5400 metros de altura denominado J4.	14
3.8. Sistema de radar desplegado sobre la superficie del glaciar Juncal Norte	15
3.9. Equipo GPS móvil junto al sistema de radar sobre el glaciar Juncal Norte.	16
3.10. Transectas planificadas y rutas ejecutadas en terreno	16

3.11. Radargrama de transecta longitudinal desde la estación JU-EN hacia la estación ABASE.	18
3.12. Vista general de la zona de ablación y equilibrio del glaciar Tyndall junto a las rutas sobre el glaciar que fueron planificadas y ejecutadas.	20
3.13. Topografía subglaciar de la transecta ubicada sobre la zona de ablación del glaciar Tyndall.	21
3.14. Los desplazamientos sobre el glaciar fueron realizados usando las medidas de seguridad pertinentes.	22
3.15. Instalación de balizas, mediciones de radio eco sondaje sobre la zona de ablación del glaciar Tyndall.	23
3.16. Perfil de radar en formato A capturado en el glaciar Tyndall en un punto en la zona central del glaciar denominado A04.	23
7.1. Área de estudio sobre del glaciar Jotabeche	41
7.2. Modelo utilizado para obtener el volúmen de hielo en el glaciar Jotabeche	42
7.3. Área de estudio de la masa de hielo del glaciar Juncal Norte	43
7.4. Modelo utilizado para obtener el volúmen de la masa de hielo del glaciar Juncal Norte	44
7.5. Áreas de estudio ubicadas sobre la masa de hielo del glaciar Tyndall	46
7.6. Modelo utilizado para obtener el volúmen de la masa de hielo del área 1, sobre el glaciar Tyndall	47
7.7. Modelo utilizado para obtener el volúmen de la masa de hielo del área 2, sobre el glaciar Tyndall	48
7.8. Modelo utilizado para obtener el volúmen de la masa de hielo del área 3, sobre el glaciar Tyndall	48
C.1. Acceso desde el campamento Caspiche hacia el glaciar Jotabeche.	69
C.2. Acceso a las cercanías del glaciar Jotabeche a una altura aproximada de 5125 metros, por medio de vehículos doble tracción.	70
C.3. Camino interior hacia el glaciar Juncal Norte obstruido por un rodado	71

C.4. Acceso a la lengua del glaciar Juncal Norte a través del cajón del Río Juncal	71
C.5. Vista panorámica del Nevado Juncal y a su derecha el Alto los Leones	71
C.6. Ubicación general del lugar de posada del helicóptero, desde donde se transportó al personal y se procedió al porteo de la carga en general (32°52' S, 70°09' O)	72
C.7. Helicóptero posado en lugar donde se instaló el campamento base sobre la lengua terminal del glaciar Juncal Norte	73
C.8. Campamento base sobre el glaciar Juncal Norte a una altura aproximada de 3300 metros , (32°59' S, 70°05' O)	73
C.9. Trayecto recorrido entre la guardería Grey, Parque Nacional Torres del Paine y el sector denominado cañadon doña Rosa donde se instaló el campamento base.	74
C.10. Acceso al glaciar Tyndall desde el campamento base instalado en el cañadon doña Rosa.	75
D.1. Traza en formato tipo A obtenida en la baliza B01.	77
D.2. Traza en formato tipo A obtenida entre las balizas B01 y B02.	77
D.3. Traza en formato tipo A obtenida en la baliza B02.	77
D.4. Traza en formato tipo A obtenida entre las balizas B02 y B03.	78
D.5. Traza en formato tipo A obtenida en la baliza B03.	78
D.6. Traza en formato tipo A obtenida entre las balizas B03 y B04.	78
D.7. Traza en formato tipo A obtenida en la balizas B04.	79
D.8. Traza en formato tipo A obtenida entre las balizas B04 y B05.	79
D.9. Traza en formato tipo A obtenida en la baliza B05.	79
D.10. Traza en formato tipo A obtenida entre las balizas B05 y B06.	80
D.11. Traza en formato tipo A obtenida en la baliza B06.	80
D.12. Traza en formato tipo A obtenida entre las balizas B06 y B07.	80

D.13. Traza en formato tipo A obtenida en la zona central del glaciar Jotabeche a 5400 m.s.n.m. (Punto JOTA3)	81
D.14. Traza en formato tipo A obtenida en la zona central del glaciar Jotabeche a 5400 m.s.n.m. (Punto JOTA4).	81
D.15. Recorridos realizados sobre la zona del glaciar Juncal Norte.	82
D.16. Radargrama entre la estación T10 hasta JU-EN y la estación T9 hasta T10.	83
D.17. Radargrama entre la estación T8 hasta la estación T9.	84
D.18. Radargrama entre la estación T7 hasta la estación T8.	84
D.19. Radargrama entre la estación T6 hasta la estación T7.	85
D.20. Radargrama entre la estación T4 hasta la estación T5.	85
D.21. Radargrama entre la estación T3 hasta T4 y la estación T2 hasta T3.	86
D.22. Radargrama entre la estación T01 hasta T04 y la estación T01 hasta T02.	87
D.23. Radargrama entre la estación JU-EN a la estación ABASE.	88
E.1. Ruta georreferenciada, realizada desde el campamento Caspiche, propiedad de la compañía minera ETON, hacia el glaciar Jotabeche.	90
E.2. Ruta aérea georreferenciada hacia la zona del glaciar Juncal Norte.	91
E.3. Trayecto georreferenciado de la zona de ablación del glaciar Tyndall.	92

Índice de cuadros

3.1. Resumen de los parámetros del sistema de radar de impulso	9
3.2. Ubicación geográfica de las estaciones sobre el glaciar Juncal Norte.	17
3.3. Resumen de los archivos capturados, trayecto, número de trazas y distancias recorridas a través de los perfiles obtenidos sobre el glaciar Juncal Norte. . .	18
3.4. Posición de las balizas (UTM), cota de superficie y espesor del hielo en cada punto.	20
4.1. Geo-receptores GPS utilizados.	26
4.2. Coordenadas de vértices geodésicos de referencia Nacional como también local. Notas: * Datum WGS-84 ** Coordenadas UTM, Huso 19 *** basado en EGM96	29
4.3. Coordenadas y desplazamiento diario (flujo glaciar, Juncal, estación base) .	31
6.1. Fecha de adquisición de las imágenes empleadas para cada área de estudio .	37
D.1. Transectas planificadas y rutas ejecutadas en terreno.	83

AGRADECIMIENTOS

La Corporación Nacional Forestal, CONAF apoyó las actividades realizadas dentro del Parque Nacional Torres del Paine, al igual que la V División del Ejército de Chile. Se agradece a la compañía minera ETON por el apoyo en la campaña al glaciar Jotabeche, especialmente al personal del campamento Caspiche. A la Universidad de Magallanes en especial al personal administrativo. Este estudio fue financiado por la Dirección General de Aguas, (DGA), del Ministerio de Obras Pública (MOP).

PRESENTACIÓN

La presente propuesta, bajo el alero del convenio suscrito con fecha 02 de septiembre de 2008 entre la Dirección General de Aguas (DGA) y la Universidad de Magallanes para la ejecución de la acción de apoyo denominada ESTIMACIONES DE VOLÚMENES DE HIELO MEDIANTE SISTEMAS DE RADAR PARA USOS GLACIOLÓGICOS EN EL NORTE CHICO Y ZONA CENTRAL DE CHILE, Y MEDICIONES GLACIOLÓGICAS EN EL GLACIAR TYNDALL, CAMPO DE HIELO SUR, el que tiene como objetivo desarrollar estudios científicos y técnicos específicos en las zonas de interés correspondientes. La Universidad de Magallanes (UMAG), la cual tiene un amplio conocimiento y prestigio en estudios glaciológicos de esta naturaleza desarrollará las actividades propuestas por la Dirección General de Aguas, DGA enfocadas en los siguientes temas:

- Estimaciones de volúmenes de hielo mediante sistemas de radar en el norte Chico y Zona Central de Chile.
- Mediciones glaciológicas en el Glaciar Tyndall, Campo de Hielo Sur.

PROYECTO:

**ESTIMACIONES DE VOLÚMENES DE HIELO
MEDIANTE SISTEMAS DE RADAR PARA USOS
GLACIOLÓGICOS EN EL NORTE CHICO Y ZONA
CENTRAL DE CHILE, Y MEDICIONES
GLACIOLÓGICAS EN EL GLACIAR TYNDALL,
CAMPO DE HIELO SUR**

UNIDAD DE GLACIOLOGÍA Y NIEVES

Resumen

El presente informe describe el total de las actividades desarrolladas como acción de apoyo encomendadas por la Dirección General de Aguas, DGA¹ a través de su Unidad de Glaciología y Nieves y realizadas por un equipo multidisciplinario de la Universidad de Magallanes, DPA² entre los meses de septiembre y octubre del 2008, periodo en el cual se realizaron tres campañas de terreno a los glaciares Jotabeche, Juncal Norte, y Tyndall respectivamente. El capítulo dos muestra el objetivo principal del estudio y enumera los objetivos específicos a desarrollar en el transcurso del proyecto junto con presentar la ubicación geográfica de cada una de las zonas. El capítulo tres presenta las mediciones realizadas mediante el sistema de radio eco sonda describiendo el principio de funcionamiento del sistema de radar y las mediciones efectuadas en cada uno de los sectores junto con describir el proceso de captura y análisis de la información recolectada, de igual forma se describe la instalación de balizas en la zona de ablación del glaciar Tyndall. El capítulo cuatro hace referencias a las mediciones efectuadas mediante los equipos de georeferenciación, describiendo el método empleado en el estudio, los datos obtenidos en cada campaña de terreno, el instrumental, el procesamiento y los resultados obtenidos. Como resultado del procesamiento de los datos GPS en la zona del glaciar Juncal se logró medir las magnitudes de la velocidad horizontal de la masa superficial, obteniendo una velocidad aproximada de 32 cm/día. En general el funcionamiento del sistema de radar como el de los equipos de GPS's de georeferenciación permitieron obtener las características de las tres zonas englaciadas involucradas en este estudio.

El capítulo cinco muestra la cartografía generada a partir de la información recolectada mediante los equipos de radar y georeferenciación, describiendo el proceso de generación de la cartografía y los parámetros utilizados para la obtención de las mismas. El capítulo seis muestra el procedimiento para obtener una representación tridimensional mediante un modelo de elevación de cada una de las zonas estudiadas con el objetivo de analizar la topografía superficial de cada una de ellas. El capítulo siete describe el procedimiento utilizado para estimar los volúmenes de hielo equivalentes en agua de cada uno de las zonas. Las mediciones de espesor realizadas mediante radio eco sonda en complemento con mediciones realizadas en campañas anteriores en el caso del glaciar Tyndall, permitieron estimar los volúmenes en cada una de las zonas para luego estimar su equivalencia en agua, por su parte en la zona del glaciar Jotabeche, se estimó un volumen de hielo equivalente en agua de $2,5119 \times 10^6 \text{ m}^3$; para el glaciar Juncal Norte un volumen de $53,87 \times 10^6 \text{ m}^3$ y para el glaciar Tyndall fue de $25130 \times 10^6 \text{ m}^3$. El capítulo ocho describe el trabajo audiovisual realizado en el contexto de la importancia del recurso hídrico denominado Pilares del Agua. Finalmente los capítulos nueve y diez presentan las conclusiones generales del estudio y las recomendaciones respectivamente, en cumplimiento con los objetivos trazados para cada una de las zonas, donde fueron desarrolladas las actividades.

¹Ministerio de Obras Públicas (MOP)

²Dirección de Programas Antárticos, DPA

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

De acuerdo al informe del IPCC del año 2007 y como respuesta a las emisiones antropogénicas de gases que acentúan el efecto invernadero, en términos generales se predice un incremento de 1 a 6 grados en la temperatura superficial hacia fines del siglo XXI. Por otro lado se predice que este aumento será aún más significativo en zonas montañosas. El recurso hídrico de nuestro país proviene en su mayoría del aporte de glaciares de montaña los cuales abastecen a un gran porcentaje de nuestra población, representando una importante fuente de reservas de agua que requieren ser determinada para un adecuado manejo de caudales. En las últimas décadas, gran parte de los glaciares del país se encuentran en retroceso y salvo algunas excepciones se encuentran en equilibrio e incluso avance. El retroceso ocurre principalmente en respuesta al calentamiento atmosférico y una posible disminución en la precipitación durante el último siglo [7]. Una de las consecuencias de la pérdida de masa glaciar es el aumento del caudal de los ríos que estos alimentan y a su vez la disminución de las reservas de agua dulce a largo plazo.

El informe de la ONU del año 2002 concluye con claridad las tendencias de las reservas de agua dulce del planeta [10]. El 40 % de la población mundial enfrentará escasez de agua [28]. Por otro lado el 71 % de la superficie del planeta está cubierta de agua, del cual solo el 3,46 % es agua potable y solo el 1,76 % corresponde a reservas de agua dulce en forma de hielo y nieve [2]. Para poder evaluar estas reservas es necesario contar con instrumentos que permitan determinar sus volúmenes.

Un parámetro clave para obtener una aproximación de la masa glaciar es conocer su espesor, el cual puede ser determinado mediante un sistema de radar utilizando técnicas de radio eco sondaje basado en la emisión de ondas electromagnéticas. Un sistema de radar, es un instrumento no invasivo de sensoramiento remoto que se constituye principalmente de un transmisor, un receptor, antenas y un sistema de adquisición de datos, el cual puede ser transportado en forma superficial o aerotransportado. El transmisor genera una señal de radio frecuencia que es radiada en dirección a un blanco (Target) a través de la antena transmisora. Cuando esta señal alcanza la frontera entre dos medios de diferentes constantes dieléctricas, parte de ella es reflejada y transmitida [29]. La señal reflejada es capturada por la antena receptora y conociendo su velocidad de propagación en el medio, la distancia entre

la antena y el blanco puede ser determinada. En resumen el espesor de la masa glaciaria puede ser determinado de acuerdo al tiempo transcurrido entre la emisión y recepción de la señal.

La Dirección General de Aguas, DGA creó la Unidad de Glaciología y Nieves con el objetivo de dimensionar los recursos hídricos contenidos en los glaciares del país y sus variaciones en respuesta al cambio climático y otros factores que los afectan; por ello, se están realizando estudios, inventarios e investigaciones con diferentes instituciones del país.

De acuerdo a lo anterior la Universidad de Magallanes y la Dirección General de Aguas suscribieron un convenio para la ejecución de una acción de apoyo denominada **ESTIMACIONES DE VOLÚMENES DE HIELO MEDIANTE SISTEMAS DE RADAR PARA USOS GLACIOLÓGICOS EN EL NORTE CHICO Y ZONA CENTRAL DE CHILE, Y MEDICIONES GLACIOLÓGICAS EN EL GLACIAR TYNDALL, CAMPO DE HIELO SUR**, contexto en el cual se desarrolló este trabajo.

Capítulo 2

OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

El objetivo general de la presente acción de apoyo es realizar estudios de radio eco sondaje (RES) en el Norte Chico y Zona Central de Chile para estimar los volúmenes de hielo contenidos en glaciares representativos, además de la caracterización de las principales variables glaciológicas del glaciar Tyndall, uno de los mayores efluentes del campo de hielo sur.

2.2. Objetivos específicos

2.2.1. Norte Chico y Zona Central de Chile

La cuenca del río Copiapó ubicada en la Región de Atacama, tiene una superficie aproximada de 18.400 km^2 y debido a la escasez de recursos hídricos en esta zona existe un gran interés por conocer los aporte de cada uno de los glaciar en épocas de estiaje, por ello se están desarrollando actividades enfocadas a estimar este recurso a través de estudios, inventarios, etc.

Por su parte, la cuenca del río Aconcagua se ubica en la región de Valparaíso, teniendo una superficie estimada en 7.337 km^2 .

El objetivo de estas mediciones glaciológicas es conocer el espesor de los glaciares en cuencas representativas del país, para estimar los volúmenes de hielo equivalentes en agua. Las mediciones de espesor serán realizadas mediante el sistema de radar de impulso el cual será transportado sobre la cubierta glaciar en forma manual por dos personas desplazándose a pie y que a su vez uno servirá de soporte para el transmisor incluyendo las antenas y

el segundo para el receptor y sus antenas como así también el sistema de adquisición de datos. Una de las personas cargara el transmisor y el segundo el receptor junto al sistema de adquisición de datos.

2.2.2. Mediciones glaciológicas sobre el glaciar Tyndall

El campo de Hielo Patagónico esta compuesto por dos masas separadas de hielo: una llamada campo de hielo sur (CHS) con una superficie aproximada de 13.000 km^2 y una segunda llamada campo de hielo norte (CHN) con una superficie aproximada de 4.200 km^2 . La gran mayoría de los glaciares de Campo de Hielo Sur (CHS) se encuentran en retroceso y salvo algunas excepciones se encuentran en equilibrio e incluso avance. El retroceso ocurre principalmente en respuesta al calentamiento atmosférico y una posible disminución en la precipitación durante el último siglo. Para determinar estos cambios sobre los glaciares es necesario realizar estudios de balance de masa, que deberán tener en cuenta la adquisición de datos de terrenos tanto en la zona de ablación como de acumulación. Un glaciar representativo de la zona de CHS es el glaciar Tyndall, debido a su gran tamaño y su similar comportamiento a otros grandes glaciares del campo de hielo. Este glaciar ubicado en el sector sudoriental del CHS fluye en dirección sur y a lo largo de 32 km, sobre una superficie aproximada de 331 km^2 , que dan paso a dos lagos proglaciares (glaciares Geikie y Tyndall). Estos parámetros indican claramente la representatividad del estudio de este glaciar sobre un contexto mayor. Por lo anterior y desde un punto de vista hídrico es de suma importancia analizar el comportamiento de la cuenca de drenaje del glaciar Tyndall que corresponde a una de las cuatro cuencas más significativas del Campo de Hielo Sur, siendo uno de los mayores aportes hídricos a la región de Magallanes y cuyo estudio permitirá visualizar sus tendencias a corto mediano y largo plazo.

Este estudio tiene por objeto comenzar a desarrollar las actividades que permitirán determinar las tasas de adelgazamiento y/o engrosamiento del glaciar Tyndall mediante la combinación de estudios glaciológicos de terreno y estudios realizados en forma remota. Esto permitirá evaluar el balance glaciológico del glaciar Tyndall y su contribución a la escorrentía de la cuenca.

2.3. Ubicación geográfica de las zonas de estudio

2.3.1. Zona Norte Chico, cuenca del río Copiapó, glaciar Jotabeche

El glaciar Jotabeche está ubicado al sureste de la ciudad de Copiapó, perteneciente a la III Región de Atacama, en el extremo meridional del Altiplano y de la cadena montañosa de los Andes Centrales, específicamente sobre el nevado Jotabeche (5860 m.s.n.m., 27°41' S, 69° O). El glaciar se extiende principalmente entre los 5100 m.s.n.m. a los 5600 m.s.n.m. alimentando el caudal del río Jorquera, uno de los tributarios más importantes de la cuenca del río Copiapó.

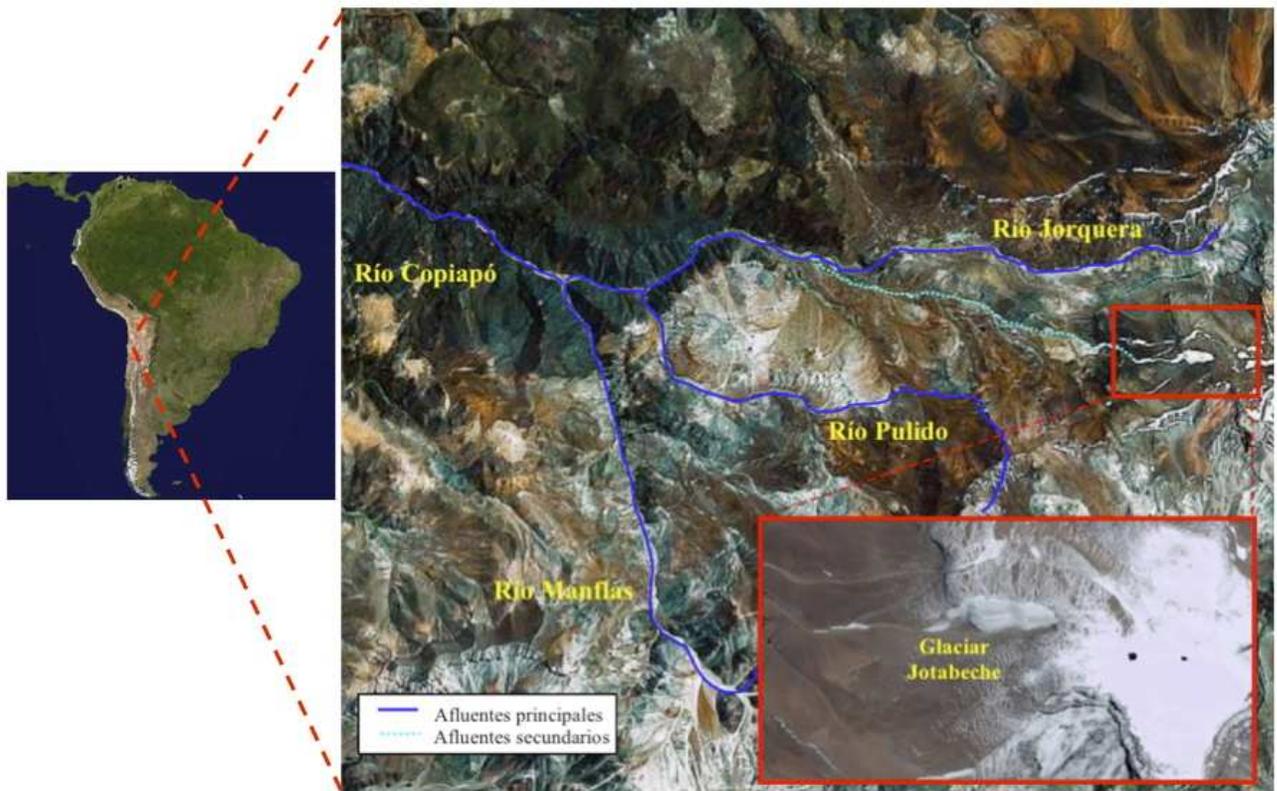


Figura 2.1: Ubicación geográfica del glaciar Jotabeche sobre la cuenca del río Copiapó

Los afluentes principales del río Copiapó son el río Manflas, Jorquera y Pulido, los que aportan caudales superficiales continuos, mostrando principalmente un régimen nival, ya que los principales caudales provienen de aportes nivales o deshielos cordilleranos [12].

2.3.2. Zona Central, cuenca del río Aconcagua, glaciar Juncal Norte

El glaciar Juncal Norte está ubicado al Norte de la ciudad de Santiago en la región de Valparaíso, sobre el nevado Juncal (6110 m.s.n.m., 33°02' S, 70°05' O) que se constituye de cuatro cumbres principales, la cumbre principal, cumbre Sur, cumbre Chilena y alto los Leones. Por su parte el glaciar Juncal Norte (Nombre asignado de acuerdo a la terminología según Liboutry) se desprende desde la cumbre del nevado Juncal a través de una cascada de hielo que termina en una gran lengua glaciar dando origen al río Juncal que es parte de la cuenca del río Aconcagua.

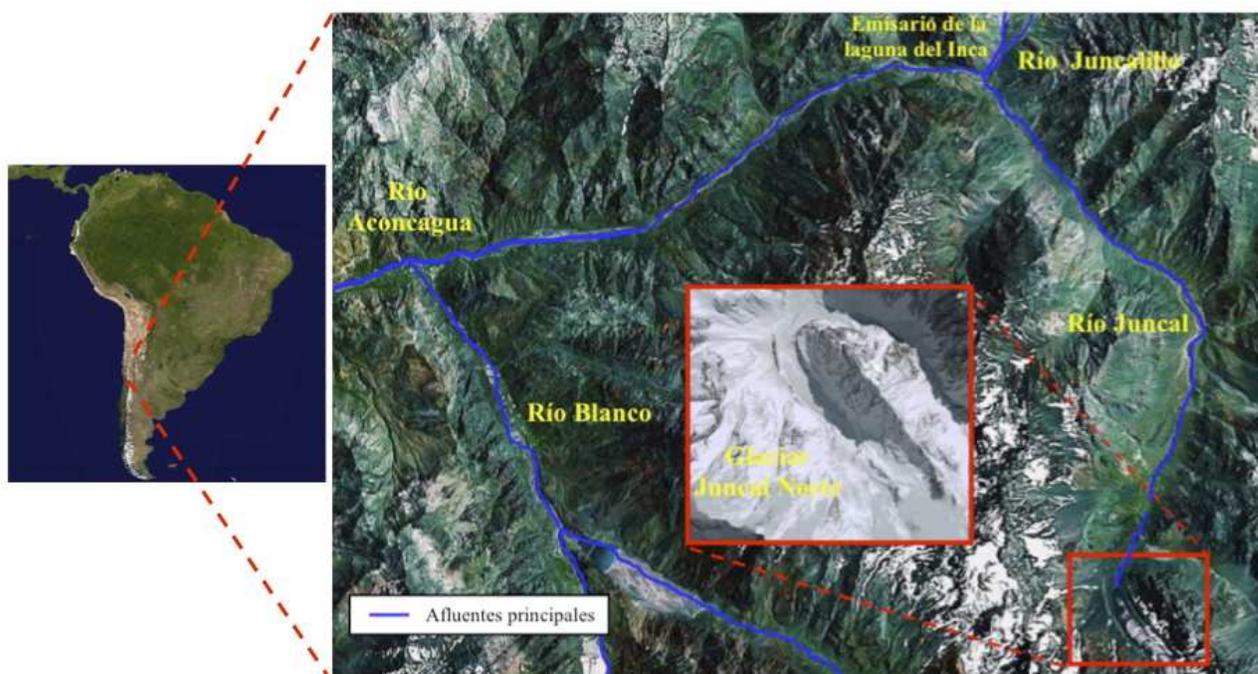


Figura 2.2: Ubicación geográfica del glaciar Juncal Norte sobre la cuenca del río Aconcagua

La cuenca del río Aconcagua está compuesta principalmente de los aportes de caudales superficiales del río Juncal y sus tributarios Juncalillo, el Blanco y el Colorado [13].

2.3.3. Zona Sur, cuenca del río Serrano, glaciar Tyndall

El glaciar Tyndall es uno de los más grandes glaciares del Campo de hielo Sur (CHS). Está ubicado en el interior del Parque Nacional Torres del Paine en el sector sudoriental del CHS, región de Magallanes ($51^{\circ}09' S$, $73^{\circ}20' O$). Este glaciar fluye en dirección sur y a lo largo de 32 Km., sobre una superficie aproximada de 331 km², dando paso a dos lagos proglaciares, el Geikie y el Tyndall, integrando a su vez a la cuenca de drenaje del río Serrano uno de los mayores aportes hídricos de Magallanes [14].

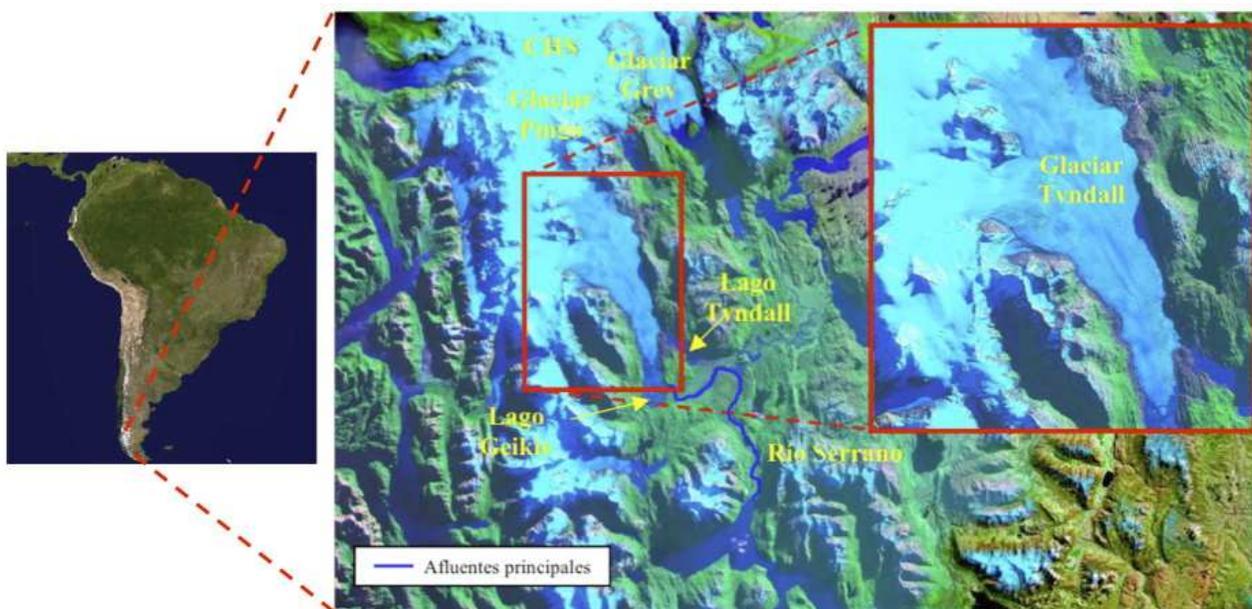


Figura 2.3: Ubicación geográfica del glaciar Tyndall, cuenca del río Serrano.

Capítulo 3

MEDICIONES DE RADIO ECO SONDAJE

3.1. Sistema de Radio Eco Sondaje

Radio eco sondaje (RES) en la actualidad es una herramienta eficiente y ampliamente utilizada en investigaciones glaciológicas. Esta herramienta puede ser utilizada para realizar mediciones glaciológicas en forma superficial sobre la masa glaciar o desde una plataforma aerotransportada, permitiendo caracterizar la topografía subglaciar, espesor del hielo y su estructura o estratigrafía interna. RES es un instrumento de sensado remoto no invasivo que esta constituido principalmente de un transmisor, un receptor, sus antenas y un sistema de adquisición de datos. El transmisor genera una señal de radio frecuencias que es propagada a través de la antena transmisora en dirección a un blanco, cuando esta señal alcanza la frontera entre dos medios de diferentes constantes dieléctricas (blanco), parte de la señal es reflejada y la otra es transmitida a través del medio, luego la antena receptora captura la señal reflejada y conociendo la velocidad de propagación de la onda en el medio, la distancia entre la antena y el blanco puede ser determinada.

El sistema de radar que se utilizará en los estudios es del tipo radar de impulso, que consiste de un transmisor que genera una señal de gran amplitud y corta duración del orden de unos cuantos nanosegundos, un receptor constituido por un adaptador de impedancias denominado BALUN (acrónimo de balanced unbalanced) y un osciloscopio digital, una antena transmisora, y una receptora como también un sistema de adquisición de datos (Computador personal y un software). El transmisor genera un pulso angosto de aproximadamente 100 ns pero de gran amplitud, alrededor de 1600 volt peak-to-peak. La energía electromagnética es propagada a través de la antena transmisora del tipo dipolo. La antena transmisora como la receptora son de 20 metros de longitud y su frecuencia central es de 5 MHz, ambas están cargadas resistivamente. Finalmente la señal de retorno es procesada por el sistema de adquisición de datos para su posterior análisis. Los principales parámetros del sistema de radar de impulso son descritos en el cuadro 3.1

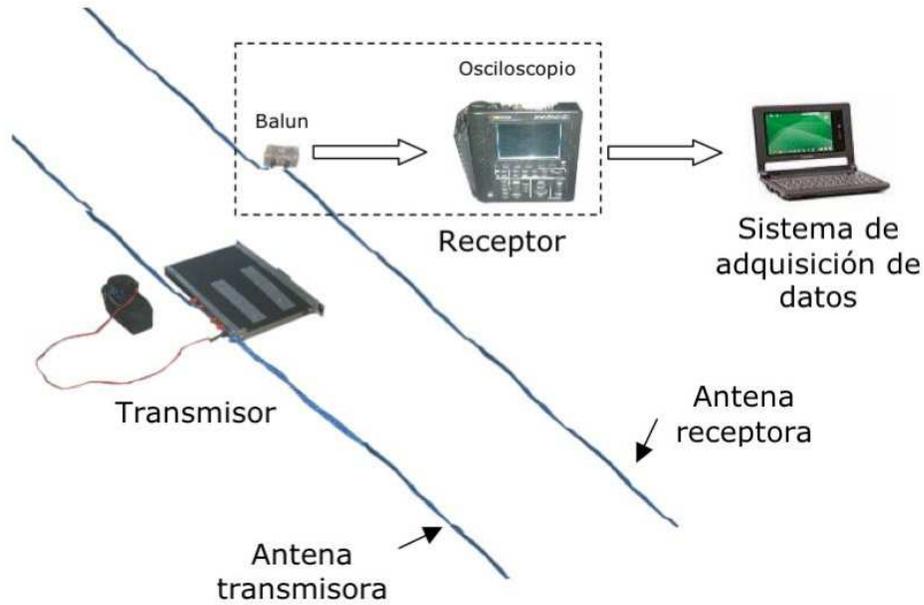


Figura 3.1: Sistema de radar de impulso.

Las mediciones de espesor mediante el uso del sistema de radio eco sondaje fueron desarrolladas mediante el sistema de radar de impulso descrito anteriormente. Por la característica físicas de la superficie de los glaciares Jotabeche y Tyndall el desplazamiento de los equipos sobre los glaciares fue realizado a pie y la información en ambos sectores fue capturada en forma discreta. El transmisor como el receptor, sus antenas y el sistema de adquisición de datos fueron desplegados a lo largo de cada una de las transectas planificadas.

Parámetros	Valor
Frecuencia central	5 MHz
Longitud de la antena	20 m
Potencia de salida	51,2 Kw
Tensión de salida	1600 Volts peak to peak
Tiempo de subida	100 ns)
Tasa de pulsos	200-400-800 p.p.s.
Temperatura de operación	+30°C / -35°C
Rango (Hielo temperado, practico)	900 metros
Resolución (Hielo temperado)	10 metros
Peso	20 Kg

Cuadro 3.1: Resumen de los parámetros del sistema de radar de impulso



Figura 3.2: Personal de la Universidad de Magallanes sobre el glaciar Grey, Parque Nacional Torres del Paine realizando mediciones mediante el sistema de radar de impulso (1998).

En cuanto a las mediciones sobre el glaciar Juncal Norte estas fueron realizadas utilizando el mismo sistema de radar de impulso pero esta vez el desplazamiento del sistema sobre la superficie glaciar fue realizada tractando el sistema a lo largo de las transectas planificadas y capturando la información en forma continua.

3.2. Radio Eco Sondaje en el Glaciar Jotabeche, Norte Chico

En el sector del glaciar Jotabeche se llevaron a cabo exclusivamente mediciones de espesor de la masa glaciar por medio de Radio Eco Sondaje sobre el sector central del glaciar Jotabeche, a una elevación aproximada de 5450 m.s.n.m. En esta oportunidad se realizaron únicamente dos mediciones de profundidad, cuya ubicación es representada por los puntos J03 y J04 en la carta correspondiente al glaciar Jotabeche, del ANEXO F.

Para realizar las mediciones sobre el glaciar Jotabeche se utilizó el sistema de radar descrito anteriormente, empleando dipolos de 10 metros de longitud dispuestos en forma paralela y separadas a una distancia de 10 metros. Uno de los puntos capturados es mostrado en la figura 3.7 como imagen tipo A¹ correspondiente al punto J04 el cual se obtuvo a una escala de tiempo de 1×10^{-7} s/div y una separación entre la señal superficial y el eco de retorno de aproximadamente 2,4 divisiones. Este perfil muestra el formato A capturado a los 5400 m.s.n.m. de altura sobre el glaciar Jotabeche en la región de Copiapó.

A partir de esta información es posible determinar el espesor del glaciar empleando las ecuaciones 3.1 y 3.2 descritas en el punto 3.5.1. con una permitividad relativa del hielo de

¹Representación gráfica de una traza almacenada en formato *.dzt

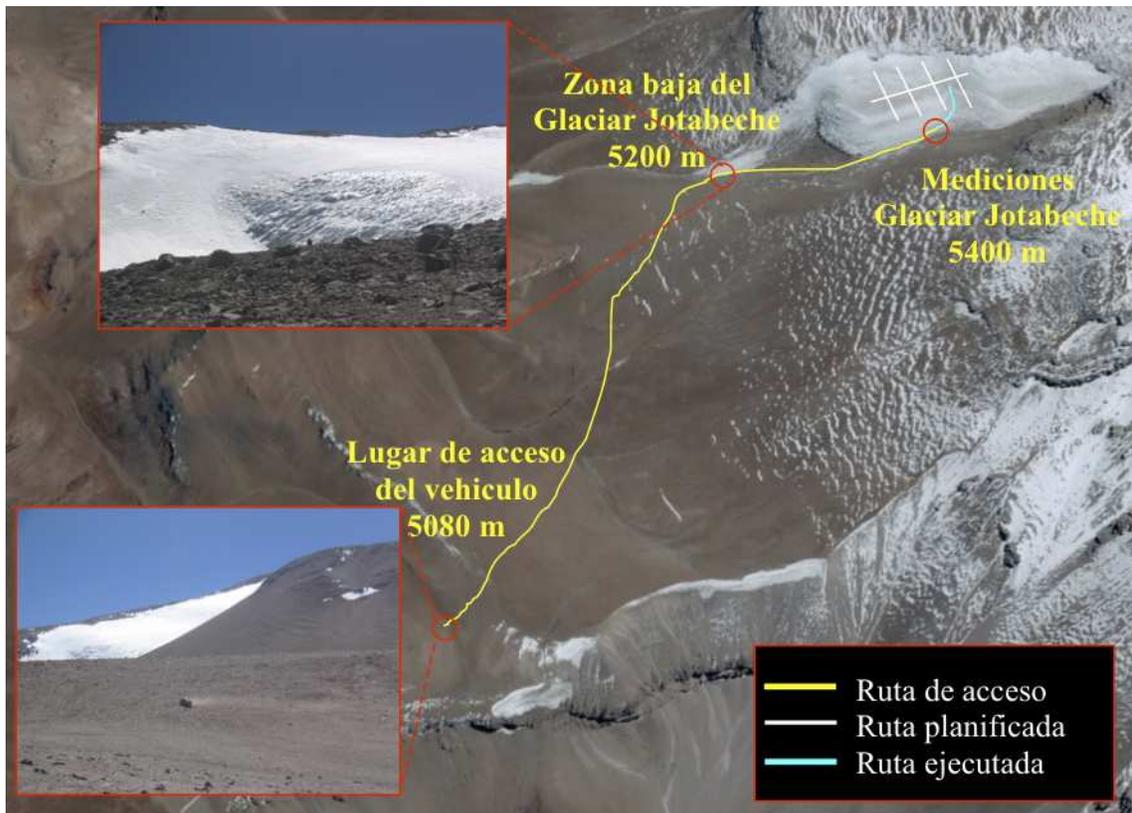


Figura 3.3: Ruta utilizada para acceder al glaciar Jotabeche ubicado a 5200 m.s.n.m.

3.17 equivalente a la velocidad de propagación de $168 \text{ (m}/\mu\text{s)}$ [6] obteniendo un espesor de aproximadamente 40 metros de profundidad.

Para poder realizar las mediciones, el primer objetivo fue acceder al borde del glaciar y evaluar su acceso, estableciendo los objetivos específicos relacionados con los trabajos a desarrollar sobre su superficie. En cuanto a las dificultades de operación, la altura y las características físicas del glaciar dificultaron el accionar, especialmente, por la fuerte pendiente sobre la zona de menor elevación, como puede ser apreciado en la figura 3.4, superando los 50° de inclinación.

Una vez instalados en al borde del glaciar se estableció una ruta de acceso hasta un lugar que presentaba las condiciones para desarrollar las mediciones mediante el uso del sistema de radar, por su menor pendiente, ubicado aproximadamente a los 5400 m.s.n.m. Luego de un esforzado ascenso hasta el lugar se realizaron mediciones de radar junto a la georeferenciación de los puntos medidos mediante el uso de GPS's en modo diferencial, utilizando una estación GPS móvil en complemento con una estación GPS fija, las cuales permitieron alcanzar mediciones de calidad topográfica. La estación fija se ubicó en un punto monumentado, aproximadamente a los 4800 m.s.n.m. de altura y a una distancia en línea recta de 2 Km hacia el glaciar Jotabeche. El lugar de la estación se muestra en la figura 3.6 donde es posible apreciar la antena del GPS instalada sobre la monumentación.

En la figura 3.3 es posible apreciar en forma general el sector aledaño al glaciar Jota-



Figura 3.4: Borde del glaciar Jotabeche a una altura aproximada de 5200 m.s.n.m., pendiente del glaciar en la zona baja (Aprox. 50° de inclinación) . Inspección de la zona central del glaciar donde se realizaron las mediciones.



Figura 3.5: Sistema de radar desplegado sobre la zona central del glaciar Jotabeche, donde se realizaron las mediciones.

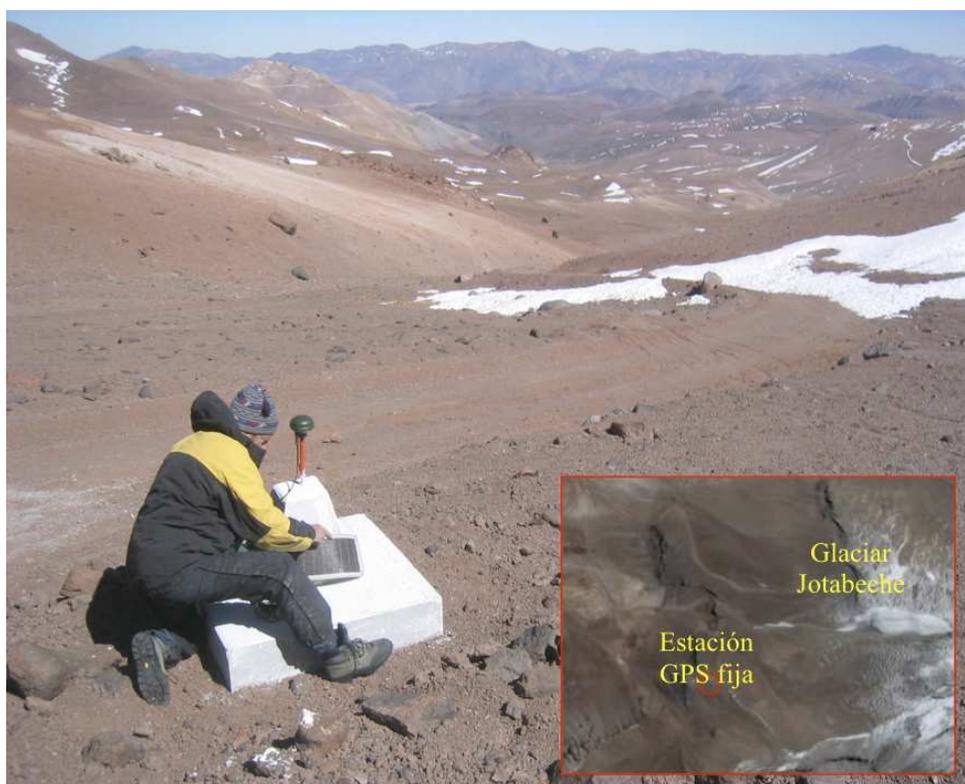


Figura 3.6: Ubicación de la estación GPS fija utilizada en la campaña al glaciar Jotabeche a una altura de 4800 m.s.n.m. la cual será utilizada para el procesamiento de datos en forma diferencial

beche, en donde se indica la ruta de acceso realizada a pie en color amarillo, desde el punto ubicado aproximadamente a los 5080 m.s.n.m., lugar al cual fue posible acceder en un vehículo doble tracción, para luego continuar a pie cargando los equipos de medición en mochilas y pasando por la base del glaciar ubicada aproximadamente a los 5200 m.s.n.m. para continuar hasta aproximadamente los 5400 m.s.n.m. Ya sobre la zona central del glaciar fue posible medir el espesor del hielo utilizando radio eco sonda y estimar el espesor del glaciar en ese sector.

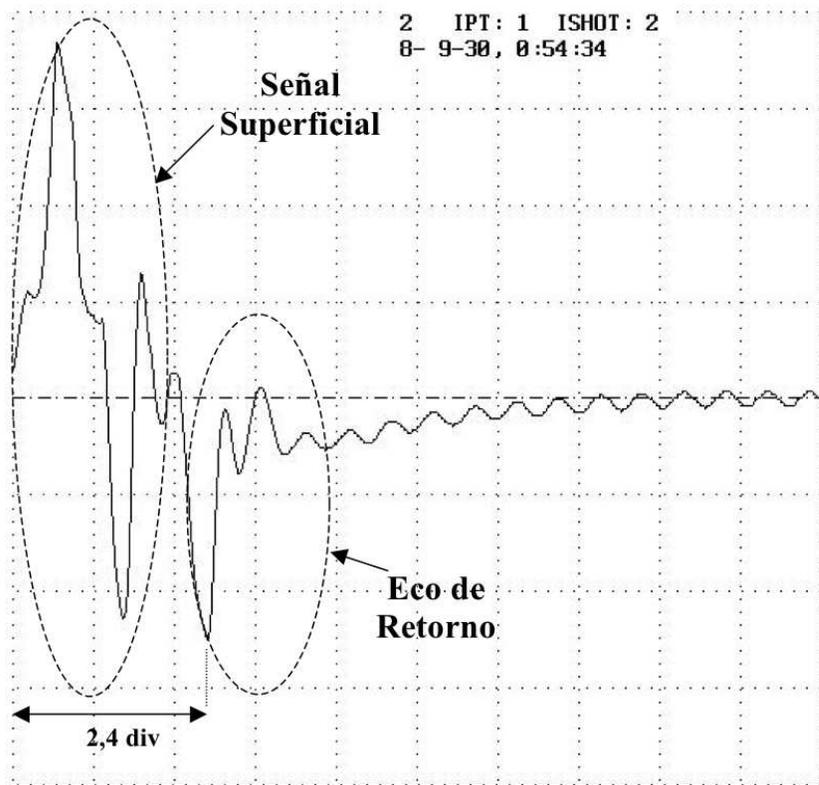


Figura 3.7: Traza en formato tipo A capturada en la zona central del glaciar Jotabeche a 5400 metros de altura denominado J4.

3.3. Radio Eco Sondaje en el Glaciar Juncal Norte, Zona Central

Una vez establecido el campamento base sobre el galciar Juncal Norte se realizó un reconocimiento sobre la zona de estudio y en forma paralela se probó sobre la superficie glaciar el sistema de radio eco sondaje. El sistema de radar fue desplegado sobre la superficie glaciar correspondiente a la zona de ablación del mismo. El equipo utilizado fue el mismo sistema de radar de impulso digital y portátil utilizado en el glaciar Jotabeche, pero esta vez el transmisor y el receptor estuvieron dispuestos en configuración lineal unidos mediante cintas de escalada como lo muestra la figura 3.8, las cuales a su vez transportan en su interior los dipolos resistivos correspondientes a su antena transmisora y su antena receptora. El sistema en general tiene un largo de 30 metros y fue transportado sobre la superficie glaciar tirando manualmente las cintas.



Figura 3.8: Sistema de radar desplegado sobre la superficie del glaciar Juncal Norte

El trabajo sobre el glaciar fue realizado desde el campamento base y las mediciones se efectuaron sobre las transectas descritas en la figura 3.10, cuyos trayectos fueron georeferenciados utilizando dos receptores GPS, utilizado uno de ellos como estación base y el segundo como estación móvil con el objetivo de procesar la información recolectada utilizando el método de corrección diferencial para lograr una mejor aproximación. La figura 3.9 muestra el equipo GPS utilizado como estación móvil junto al sistema de radar.



Figura 3.9: Equipo GPS móvil junto al sistema de radar sobre el glaciar Juncal Norte.

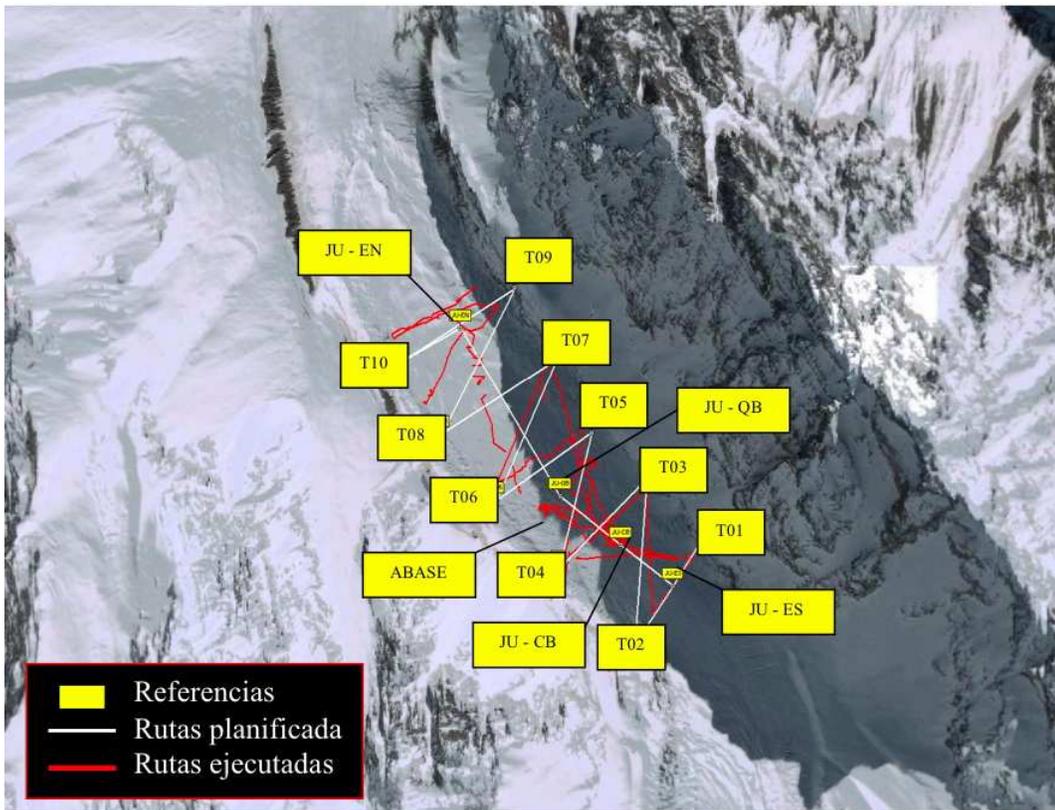


Figura 3.10: Transectas planificadas y rutas ejecutadas en terreno

Estación	Este	Norte	Comentario
JU-CB	396905	6348653	CB = Campamento Base
JU-EN	396284	6349396	EN = Extremo Norte
JU-ES	397108	6348514	ES = Extremo Sur
JU-QB	396669	6348819	QB = Quiebre Base
T01	397246	6348722	
T02	396962	6348311	
T03	397002	6348884	
T04	396669	6348570	
T05	396790	6349041	
T06	396428	6348801	
T07	396656	6349292	
T08	396218	6349027	
T09	396492	6349535	
T10	396064	6349278	

Cuadro 3.2: Ubicación geográfica de las estaciones sobre el glaciar Juncal Norte.

En la zona de ablación del glaciar Juncal Norte se realizaron mediciones utilizando el sistema de radar de impulso descrito en el punto 3.1. Estas mediciones se efectuaron a lo largo de un perfil longitudinal ubicado en el centro de la lengua terminal del glaciar, abarcando una distancia aproximada de 1,5 km, a elevaciones desde los 2700 m.s.n.m. a los 3300 m.s.n.m., además se realizaron 9 perfiles transversales como se describe en la figura 3.10.

El total del recorrido realizado es representado por las líneas de color rojo sobre la figura 3.10 cubriendo una distancia aproximada de 5,9 Km y abarcando un área de 1,2 km². El sistema de radar utilizó antenas del tipo dipolo resistivo de 10 metros de largo con una frecuencia central de 5 MHz que es calculada utilizando la expresión descrita en [16]. A partir de la información capturada por el sistema de radar fue posible obtener el espesor del hielo a lo largo de cada uno de los perfiles, caracterizando de esta forma el fondo subglaciar que en complemento con la topografía superficial permite obtener un modelo del sector en estudio.

Las mediciones de topografía superficial fueron realizadas mediante el uso de GPS's de calidad topográfica utilizando dos receptores GPS marca NOVATEL, modelo Smart Antenna, uno utilizado como estación base y el segundo como estación móvil, ambos receptores capturaron posiciones simultáneamente a intervalos de 1 segundo mientras se desarrollaban los trabajos de terreno. Las posiciones capturadas por el equipo base, localizado en las cercanías del campamento base y las del móvil fueron almacenadas en un data-logger de igual forma como se obtuvieron las posiciones en el equipo móvil. La figura 3.11 muestra un ejemplo de un radargrama capturado a lo largo de un perfil longitudinal entre las estaciones JU-EN y ABASE de la zona de ablación del glaciar Juncal Norte, donde el espesor máximo corresponde aproximadamente a 215 metros. El total de los radargramas obtenidos se muestra en el ANEXO D.

Archivos	Trayecto Inicio - Término	Número de trazas	Distancia Recorrida (m)
J0		291	Prueba
T01T02	T01-T02	68	250
T1AT02	T01-T02	58	Prueba
1AT02B		166	Prueba
T02BT03A	T02-T03	226	416 (Prueba)
T03T04	T03-T04	80	380
T04T05	T04-T05	263	420
T05T06	T05-T06	640	383
T06T07	T06-T07	388	471
T07T08	T07-T08	411	477
T08T09	T08-T09	455	424
T09T10	T09-T10	426	404
T10JU-EN	T10-JU-EN	2141	253
AJU-EN	JU-EN - ABASE	2167	676
ABASE	ABASE-JU-CB	1049	335
ES-T01	T01- JU-ES	97	150
T01T04	T01-TO4	278	492
04T05	T04-T05	397	423
TOTAL RECORRIDO			5954 (m)

Cuadro 3.3: Resumen de los archivos capturados, trayecto, número de trazas y distancias recorridas a través de los perfiles obtenidos sobre el glaciar Juncal Norte.

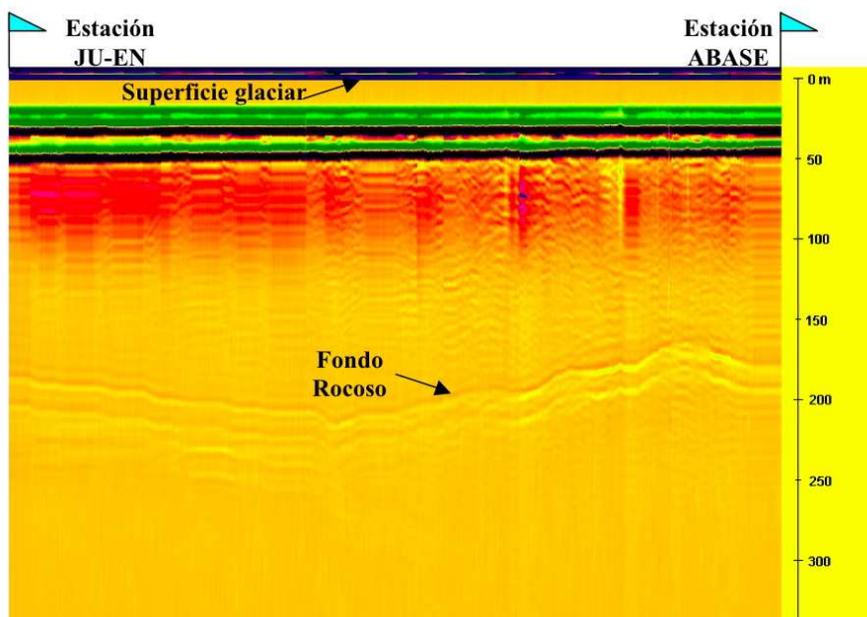


Figura 3.11: Radargrama de transecta longitudinal desde la estación JU-EN hacia la estación ABASE.

3.4. Radio Eco Sondaje e instalación de balizas en el Glaciar Tyndall, Campo de Hielo Sur, (CHS)

A diferencia de las dos zonas anteriores las actividades sobre el glaciar Tyndall no solo estuvieron orientadas a determinar el volúmen de la masa glaciar sino también realizar mediciones glaciológicas con el objetivo de entender a mediano plazo la dinámica del glaciar. Las actividades contempladas fueron:

1. Caracterizar la dinámica del glaciar sobre la zona de ablación y equilibrio.
2. Análisis de imágenes satelitales.
3. Instalación y lectura de balizas.
4. Mediciones de velocidad y flujo del hielo glaciar.

Las actividades realizadas sobre el glaciar Tyndall estuvieron limitadas por las inestables condiciones climáticas, por esta razón los objetivos se centraron exclusivamente en la zona de ablación. En esta oportunidad se instalaron 8 balizas en una transecta de aproximadamente 3,2 Km de longitud. Estas balizas fueron introducidas en el interior del hielo glaciar en las coordenadas geográficas expresadas en UTM² de acuerdo al cuadro 3.4.

Una vez en el borde del glaciar sobre la zona de ablación, el acceso a este es sencillo, sin embargo la dificultad se presenta en el porteo de los equipos desde el campamento hasta el borde del glaciar, porque toda la instrumentación deberá ser porteada sumándole a esto el desplazamiento sobre la roca húmeda, que en ocasiones torna peligroso el desplazamiento. La planificación de los trabajos contempló desplazamientos en la zona de ablación para la instalación de balizas de ablación, como también actividades sobre la zona de equilibrio del glaciar.

El objetivo de las balizas es poder establecer estaciones de control para estimar la velocidad del glaciar, dirección del flujo superficial y el estado del balance de masa del área realizando remediciones de la posición en diferentes épocas del año por medio del uso de sistemas GPS's.

Para instalar las balizas fue necesario transportar 8 tubos de plástico tipo Valco hasta el glaciar, en tiras de 12 metros y en cuyo interior se instaló un tubo de acero que actúe como contrapeso. Estas balizas fueron instaladas en el glaciar mediante el uso de una sonda o taladro a vapor, compuesto de un estanque de aluminio, una manguera de alta presión y una punta de lanza. En el interior del estanque la presión es aumentada mediante un quemador y canalizada a través de la manguera en cuya punta una lanza irriga el vapor a alta presión hacia el exterior permitiendo de esta manera perforar el hielo glaciar, para luego introducir la baliza en la perforación. En esta oportunidad se perforó hasta una profundidad de 11 metros,

²Proyección Universal Transversal de Mercatorde

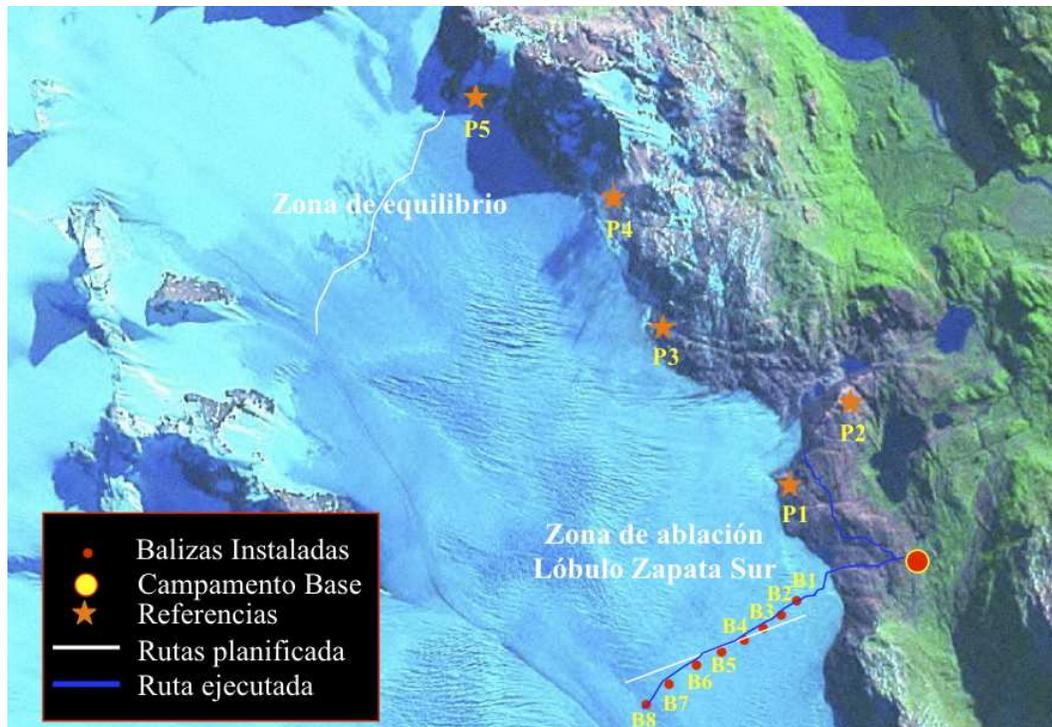


Figura 3.12: Vista general de la zona de ablación y equilibrio del glaciar Tyndall junto a las rutas sobre el glaciar que fueron planificadas y ejecutadas.

Balizas	GPS Tiempo	Fecha M/D/A	Easting (m)	Northing (m)	Cota (m)	Espesor (m)
B01	20:31:47	10/25/2008	618566.837	4334747.881	539	126,9
B01-B02	18:51:08	10/24/2008	618454.457	4334628.254	557,742	182,5
B02	20:00:23	10/25/2008	618319.207	4334479.015	580,356	265,1
B03-B02	18:21:00	10/24/2008	617722.802	4334427.284	588,383	290,4
B03	19:32:39	10/25/2008	617926.558	4334351.400	592,925	398,2
B04-B03	17:45:00	10/24/2008	617306.219	4334244.894	597,739	452,1
B04	19:10:17	10/25/2008	617530.309	4334175.926	597,439	487,5
B05-B04	14:54:34	10/25/2008	616964.167	4334028.387	600,116	507,7
B05	18:43:40	10/25/2008	617163.802	4333963.419	597	524,6
B06-B05	15:30:02	10/25/2008	616493.002	4333886.217	604.161	524,6
B06	18:19:44	10/25/2008	617163.802	4333788.993	601	548,2
B07-B06	16:07:43	10/25/2008	616143.129	4333604.993	603,423	
B07	17:51:08	10/25/2008	616332.091	4333489.183	605	
B08-B07	16:44:08	10/25/2008	615829.332	4333402.671	591,503	
B08	17:22:22	10/25/2008	615997.314	4333181.100	594.469	

Cuadro 3.4: Posición de las balizas (UTM), cota de superficie y espesor del hielo en cada punto.

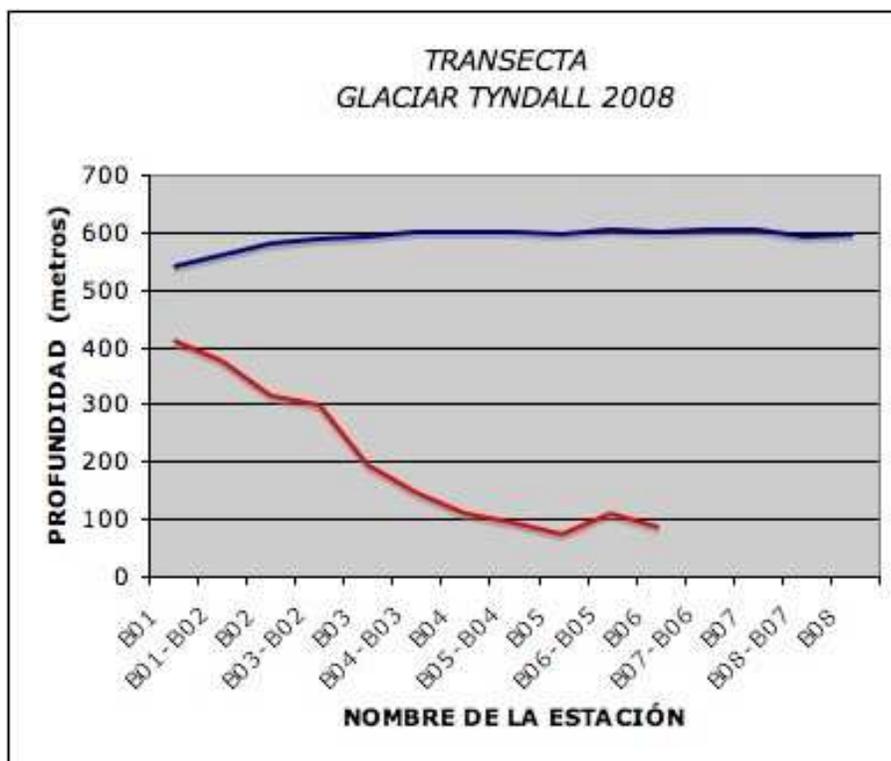


Figura 3.13: Topografía subglaciar de la transecta ubicada sobre la zona de ablación del glaciar Tyndall.

quedando la baliza expuesta un metro sobre la superficie glaciar. Esto permitirá estimar la tasa de ablación en un periodo de tiempo determinado mediante una futura remediación.

Junto con la instalación de las balizas se procedió a medir la profundidad del hielo en cada uno de los puntos donde éstas fueron instaladas, para ello se desplegó en cada una de las estaciones el sistema de radar de impulso. En la figura 3.12 se puede apreciar el lugar geográfico donde se instalaron las balizas correspondientes a los puntos B1 a B8, también se aprecian las rutas sobre el glaciar ejecutadas y los puntos de referencia P1 a P5 corresponden a la ruta planificada para acceder a la zona de equilibrio.

Para medir el espesor de la masa glaciar se realizaron mediciones puntuales haciendo uso del mismo sistema de radar de impulso utilizado en las campañas al glaciar Jotabeche y Juncal Norte, sin embargo en esta oportunidad se utilizaron antenas de 20 metros de longitud cuya frecuencia central es de 2, 5 MHz. Las mediciones puntuales fueron realizadas sobre las 8 balizas instaladas en una transecta, comenzando con la primera medición sobre la estación B01 ubicada aproximadamente a 100 metros desde el borde glaciar obteniendo un espesor aproximado inicial del hielo de 126 metros, para luego continuar aumentando hasta los 548 metros en la estación B06, luego de esta estación no fue posible obtener retornos claros que permitan identificar el fondo rocoso. La figura 3.13 muestra la topografía subglaciar a lo largo de la transecta, desde la primera medición en la baliza B01 hasta la baliza B06.

Junto a los resultados obtenidos en la campaña del glaciar Tyndall realizada en octubre del 2008 esta información fue complementada con datos obtenidos con anterioridad en



Figura 3.14: Los desplazamientos sobre el glaciar fueron realizados usando las medidas de seguridad pertinentes.

campañas realizadas por la Dirección de Programas Antárticos en cooperación con el Centro de Estudios del Cuaternario, cuyas actividades estuvieron dirigidas por el profesor Rubén Carvallo, perteneciente a la Universidad de Magallanes, utilizando el mismo sistema de radar sobre la zona del lóbulo Zapata Sur, durante dos temporadas³ en el año 2003 y 2004 . De igual forma se sumó nueva información obtenida en una campaña⁴ realizada el año 2008 sobre una extensa zona del glaciar Tyndall, utilizando un sistema de radar aerotransportado perteneciente a la Universidad de Münster, Alemania, quienes trabajan en estrecha cooperación con el Centro de Estudios Científicos de Santiago (CECS) y la Universidad de Magallanes, permitiendo determinar su topografía subglaciar. La recopilación de esta información permitirá ampliar considerablemente la zona de estudio.

La figura 3.16 muestra un perfil de radar en formato A capturado en el glaciar Tyndall. Sobre este perfil es posible observar la señal superficial y el eco de retorno aproximadamente a 6,8 (μ s) estableciendo una profundidad aproximada del hielo glaciar de 580 metros.

³Esta información se encuentra sobre la carta del glaciar Tyndall correspondiente a las líneas amarillas del ANEXO F)

⁴Esta información se encuentra sobre la carta del glaciar Tyndall correspondiente a las líneas rojas del ANEXO F)



Figura 3.15: Instalación de balizas, mediciones de radio eco sondaje sobre la zona de ablación del glaciar Tyndall.

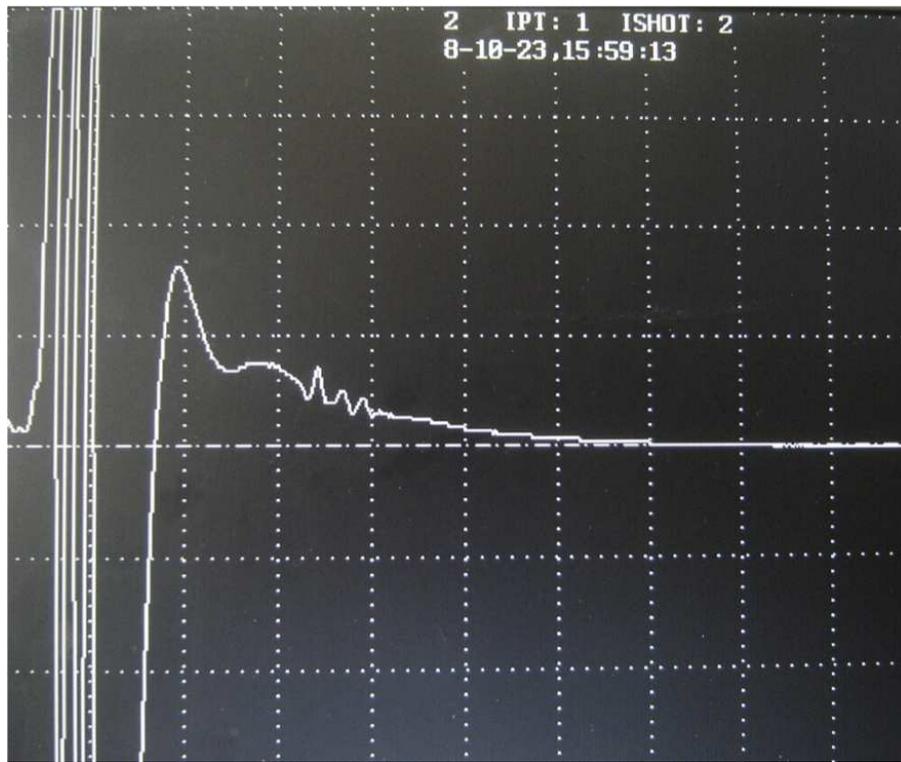


Figura 3.16: Perfil de radar en formato A capturado en el glaciar Tyndall en un punto en la zona central del glaciar denominado A04.

3.5. Captura y análisis de datos de radar

Una vez capturado los datos en terreno mediante el uso del sistema de radar estos datos son almacenados en forma digital en un computador personal. La captura y almacenamiento de los datos es realizado por medio de programas específicos ejecutables en lenguaje Quick-Basic® , por medio de estos programas es posible ajustar los parámetros de captura y almacenamiento. La información es capturada definiendo el número de disparos, formato de los datos, tiempo y amplitud entre otros. Los datos capturados mediante el sistema de radar son almacenado simultáneamente con datos GPS's, el registro de tiempo de captura del radar para cada dato el que permite sincronizar esta información con datos de georeferenciación obtenidos mediante receptores GPS s. La información es capturada y almacenada en trazas con extensión dzt, correspondiente a información en lenguaje ASCII que es transformable a información vectorial la cual permite el manejo y despliegue de los datos con el objetivo de su interpretación. Esta vectorización es posible de realizar luego de una serie de conversiones mediante el software Idrisi32® , desplegando la información en pantalla donde los datos son analizados y procesados con diferentes filtros para adecuar la imagen y observar de mejor forma las características de interés, por ejemplo la determinación del fondo subglaciar o su estratigrafía interna. Una vez que la información esta desplegada claramente en pantalla es posible reconocer el fondo subglaciar siendo necesario realizar una nueva conversión de la imagen, esta vez información vectorial a Raster⁵. Este proceso se realiza en el mismo software Idrisi32® , que permite el traspaso de la información a una planilla EXCEL® , para finalmente obtener valores reales de espesor por cada traza con un determinado tiempo de captura, que permiten en conjunto con la información de los equipos GPS's de georeferenciación, obtener el valor real de espesor del glaciar y su posición, mediante la sincronización de los tiempos de medición entre el sistema de radar y el sistema de georeferenciación.

3.5.1. Cálculo del espesor del hielo

La interpretación del espesor del hielo se define mediante la relación 3.1

$$D = \sqrt{\left(t + \frac{s}{c}\right)^2 \frac{c^2}{4\epsilon_i} - \frac{s^2}{4}} \quad , \quad (3.1)$$

Donde

$$t = \frac{t_{escala}}{n_{puntos}} n_{divisiones} (P_{Eco} - P_{Disparo}) \quad , \quad (3.2)$$

En la ecuación 3.1, D es el espesor del hielo expresado en metros, s la distancia entre el transmisor y el receptor, c la velocidad de la señal en el vacío, ϵ_i la permitividad dieléctrica del hielo. En la ecuación 3.2 t_{escala} represente la escala de tiempo, n_{puntos} el número de puntos de la pantalla, $n_{divisiones}$ el número de divisiones de la pantalla, P_{Eco} el píxel de inicio del eco y $P_{Disparo}$ el píxel de inicio del disparo.

⁵Estructura de datos que representa una grilla rectangular de pixeles.

El valor de la permitividad dieléctrica utilizada para el cálculo de todos los espesores fue de 3.17 obteniendo un valor de velocidad de propagación de la señal de radiofrecuencias del orden de $168 \text{ (m}/\mu\text{s)}$ [3].

Capítulo 4

GPS - GEORREFERENCIACIÓN

4.1. Descripción del método GPS empleado en el estudio

El Sistema Global de Posicionamiento (GPS) es un sistema de radio navegación, desarrollado por los Estados Unidos. El servicio de posicionamiento estándar - SPS (Standard Positioning Service) facilita las señales de uso civil 24 horas por día, en cualquier lugar del planeta, posibilitando la obtención continua de tiempo (fecha/hora) y coordenadas (latitud, longitud y altura) con alta precisión. Mientras que el GPS al principio fue para fines de navegación militar, ahora predominan múltiples aplicaciones civiles, tales como: navegación, geodésia, topografía, conversión de hora con precisión, entre otros.

Durante las campañas de terreno en los Glaciares Juncal, Jotabeche y Tyndall se utilizaron geo-receptores GPS geodésicos y navegadores. Para la ligazón con los vértices de referencia de la Red Geodésica Nacional (RGN-Chile) e Internacional (Vértices del International GPS Service- IGS) se utilizaron los GPS geodésicos, con precisiones centimétricas. Los trabajos geodésicos de medición de flujo glaciar, topografía superficial, georreferenciación de los perfiles de radar, fueron realizados con equipos GPS geodésicos de frecuencia L1, logrando precisiones de algunos centímetros(ver cuadro. 4.1).

Marca	Modelo	Tipo	Precisión	Característica	Cantidad	Propietario
Novatel	Smart Antenna	Geodésico	1 cm + 1 ppm	Frecuencia L1	3	UMAG
Garmin	Etrex	Navegador	5 m	Código C/A	1	UMAG
Garmin	Emap	Navegador	8 m	Código C/A	1	Particular
Garmin	otros	Navegador		Código C/A	1	Particular

Cuadro 4.1: Geo-receptores GPS utilizados.

De la misma manera, como en anteriores proyectos desarrollados en el Campo de Hielo Sur, durante las campañas de terreno en los Glaciares Jotabeche, Juncal y Tyndall se aplicó el método de operación “**estático**” para el enlace geodésico del campamento base (Juncal) con las referencias en roca y, el método “**Stop & Go**” para georreferenciar todas las estaciones de radar sobre el glaciar. Mientras que en modo “**cinemático**” los receptores GPS van rastreando satélites en forma continua a medida que se desplazan entre estaciones, por ejemplo para los perfiles de radar y recorridos para topografía superficial, en modo “**Stop & Go**”, en cada estación se debe dar un comando al geo-receptor para indicar el inicio y término de la detención. Este método se utilizó para cada medición puntual del radar en forma estática.

4.2. Georreferenciación de datos de las campañas de terreno

Durante la ejecución de la etapa de terreno en los Glaciares Jotabeche, Juncal y Tyndall, el GPS ha constituido una herramienta esencial para georeferenciar en forma continua, en tiempo real y post-proceso, todas las actividades y capturas de datos en terreno. La totalidad de los recorridos, registrados con GPS, se encuentran indicados como trayectos georeferenciados en el Anexo E y sobre las cartas de cada zona en el Anexo F.

Todos los datos GPS recolectados, en terreno fueron transferidos a un computador PC y procesados en gabinete con software especializado.

Dependiendo de las diferentes aplicaciones se proyectó las siguientes precisiones para el posicionamiento con GPS:

- Enlace a la Red Geodésica Nacional : precisión geodésica (centimétrica)
- Radar estático y velocidad del hielo : precisión geodésica (centimétrica)
- Perfiles de Radar : precisión topográfica (centi- a decimétrica)
- Topografía superficial : precisión topográfica (centi- a decimétrica)
- Replanteo de puntos planificados : precisión de navegación (varios metros)

4.2.1. Instrumental

Durante las campañas de terreno, se emplearon tres geo-receptores GPS geodésicos de frecuencia simple marca Novatel Smart-Antenna. Estos equipos poseen características de “**Alta precisión**” en “**L1**” y para fines de navegación y replanteo, se trabajó con varios equipos GPS navegadores.

4.2.2. Metodología y configuración en la recolección de datos

Para realizar la georeferenciación se utilizaron dos receptores geodésicos utilizados en forma diferencial estableciendo una estación de referencia fija y la otra móvil. En el glaciar Jotabeche la estación fija se instaló en un punto monumentado, en el caso del glaciar Juncal Norte sobre su superficie, y en el glaciar Tyndall sobre una roca cercana al campamento base. Los equipos georeceptores móviles fueron utilizados en forma “estática” para el enlace a la red geodésica de referencia local “HM-25” en el caso del Jotabeche, (“Junc24” y “Junc25” en el Juncal, y “Base299” para el Tyndall), los cuales están ligados a la Red Geodésica Nacional (RGN).

Para la geo-referenciación de los trabajos de topografía superficial y mediciones mediante el sistema de radar, se utilizaron hasta dos geo-receptores geodésicos los cuales fueron montados sobre jalones Porta-prismas. De esta forma prácticamente todos los recorridos y cada una de las mediciones de radar fueron registrados y monitoreados en modo “cinemático”, siendo utilizados como antecedentes para la modelación de la topografía en el área de estudio (Anexo F). En algunas mediciones se aplicó el método “Stop & Go” .

La frecuencia de grabación de los datos satelitales GPS, fue de 1 segundo, tanto para mediciones de tipo “cinemático” “Stop & Go” como también para el modo “estático”.

En las presentes campañas de terreno, entre otros, debido a las dificultades de acceso a otros vértices de la RGN, se ocupó para la ligazón a la RED SIRGAS (Sistema Internacional de Referencia Geocéntrico para las Américas), estaciones del IGS, cuyos datos están disponibles vía Internet.

Los receptores GPS de navegación fueron utilizados para la localización y replanteo de los vértices de medición programados previamente, además sirvieron de respaldo para la georeferenciación de las actividades, en caso de algún problema de energía o de contacto de los receptores geodésicos.

4.3. Sistemas de coordenadas

Actualmente en Chile el **Instituto Geográfico Militar, IGM** edita su Cartografía en el Datum geodésico SIRGAS. Para fines prácticos el SIRGAS puede ser considerado equivalente al conocido sistema WGS-84 y fue considerada como marco de referencia geodésica del presente proyecto.

Para todos los procesamientos de datos y las representaciones gráficas de los resultados, se utilizaron los parámetros del Sistema Geodésico Global WGS-84 y la proyección Universal Transversal de Mercator (UTM). En los sectores Juncal y Jotabeche se aplicó el Huso 19, con el meridiano central de 69° Oeste y, en el sector Tyndall corresponde el Huso 18 con el meridiano central de 75° Oeste respectivamente.

Nombre	Coordenadas geográficas*		Altura Elipsoidal (m)	Coordenadas planas (UTM)**		Altura*** Ortométrica (m)
	Lat - Sur (° ' ")	Long- Oeste (° ' ")		Este (m)	Norte (m)	
SANT	33°09'01.03907"	70°40'06.79652"	723.073	344386.465	6330812.569	695.636
PARC	53°08'13.03955"	70°52'47.57858"	22.307	374246.240	4110843.329	13.564
COPO	27°23'04.29917"	70°20'17.65347"	479.087	367674.160	6970262.747	448.254
HM-25	27°42'03.8365 "	69°15'44.5615 "	4836.037	474131.420	6935883.863	4797.421
JUNC-24	32°59'43.9387 "	70°06'12.4005 "	3212.866	396913.002	6348667.035	3181.282
JUNC-25	32°59'43.9298 "	70°06'12.4072 "	3212.922	396912.826	6348667.309	3181.339
BASE-299	51°07'13.2447 "	73°16'57.5778 "	366.921	200324.631	4328066.075	351.507

Cuadro 4.2: Coordenadas de vértices geodésicos de referencia Nacional como también local. Notas: * Datum WGS-84 ** Coordenadas UTM, Huso 19 *** basado en EGM96

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. El EGM96 es de uso público y puede ser consultado en la página Internet de la NASA:

<http://cddis.nasa.gov/926/egm96/egm96.html> (verificado en febrero de 2009)

Los programas computacionales utilizados, incluyen opciones para aplicar el modelo EGM96.

En el marco del presente Proyecto Glaciológico y Geodésico y, basado en las coordenadas de las estaciones IGS y de la Red Geodésica Nacional (RGN) "SANT" (Santiago), "COPO" (Copiapó) y "PARC" (Punta Arenas) mediante GPS geodésico fueron determinadas las coordenadas precisas de las respectivas estaciones de referencia locales, "Junc24" y "Junc25" en el Juncal, "HM-25" en el caso del Jotabeche y "Base299" para el Tyndall. En el cuadro 4.2 se indican las coordenadas de los vértices de referencia.

4.4. Procesamiento de datos

Diariamente, los datos recolectados con los receptores GPS, fueron traspasados a un computador PC-Notebook y, para mayor seguridad respaldados en los discos duro de un segundo computador. Con fines de validación y revisión de los datos, en períodos de mal tiempo se realizó un pre-procesamiento en terreno. El procesamiento definitivo de todas

las observaciones satelitales GPS se efectuó posteriormente en gabinete con un computador PC-Desktop tipo Pentium IV utilizando el software **GrafNav/GrafNet®**, Vers. 7.00, de Waypoint Consulting Inc.

Las fases del procesamiento de los datos GPS se caracterizan por la siguiente secuencia:

1. Colección de datos en terreno, y traspaso a computador con software **GrafNav®**.
2. Conversión de datos originales (*.txt y *.log) a formato intermedio. Mediante el programa **GrafNav®** se generan 3 archivos (*.sta, *.gpb, *.epp) por cada archivo original o por cada estación ocupada dependiendo de la opción de conversión seleccionada.

Mientras que las observaciones del modo “estático”, “cinemático” y “Stop & Go” fueron procesadas con el programa **GrafNav®**, adicionalmente las mediciones efectuadas en modo “estático” fueron procesadas con **GrafNet®** y, además convertidas con el mismo programa al formato RINEX ¹. Se generaron dos archivos por cada estación (*.08O y *.08N). Los archivos RINEX *.08O contienen los antecedentes de las estaciones levantadas, como su nombre, altura de antena, modo de operación, coordenadas aproximadas y los parámetros observados (observables satelitales), mientras los archivos *.08N contienen la información de navegación para cada uno de los satélites GPS, es decir sus parámetros orbitales actuales (efemérides). Finalmente los archivos RINEX, generados por cada estación fija fueron procesados con el sistema **GrafNav/GrafNet®**, Vers.7.0 para comprobar las coordenadas finales en datum geodésico WGS-84, con cotas elipsoidales y ortométricas (m.s.n.m.), considerando el EGM96.

4.5. Velocidad superficial del hielo en el glaciar Juncal Norte

De acuerdo a los cálculos de enlace con la estación “SANT”, en gabinete se determinaron dos posiciones distintas para el vértice de referencia en el Campamento Base ubicado sobre el glaciar Juncal para los días 24 y 25 de Septiembre.

El lugar donde se estableció el campamento sobre el glaciar Juncal presenta pendientes superficiales suaves, por lo que se esperaba que las velocidades sean del orden de pocos centímetros a pocos decímetros por día [19].

El cuadro 4.3 indica las magnitudes de velocidad horizontal alcanza en la zona estudiada del glaciar Juncal Norte y su magnitud es de aproximadamente 32 cm/día. Además, la diferencia vertical de aproximadamente 6 cm podría indicar la precisión vertical del enlace GPS de frecuencia simple de una longitud superior a 55 Km de la línea base hacia la estación “SANT”.

¹Receiver Independent Exchange Format

Vertice	Este (m)	Norte (m)	Cota (m)	dE (m/d)	dN(m/d)	dH(m/d)
JUNC-24	396913.002	6348667.035	3181.282	-0.176	0.274	0.057
JUNC-25	396912.826	6348667.309	3181.339			

Cuadro 4.3: Coordenadas y desplazamiento diario (flujo glacial, Juncal, estación base)

4.6. Precisión de datos GPS

Las líneas base medidas y procesadas durante el presente estudio, arrojaron generalmente precisiones del orden de unos pocos centímetros en sus componentes planimétricos y altimétricos respectivamente. También el procesamiento de los datos registrados en modo “**Stop & go**” indica precisiones de algunos centímetros.

4.7. Presentación de los resultados

En total se generaron mediante el uso de GPS«s geodésico en modo estático, “**Stop & go**” y “**cinemático**”, más de 20 archivos GPS con un total superior a 93 MB de observaciones satelitales. La distribución espacial de las estaciones y de los recorridos en forma cinemática, se puede visualizar en el Anexo E. Las coordenadas y el desplazamiento de los vértices de velocidad en hielo se indican en el cuadro 4.3. Las posiciones GPS de las estaciones y de todos los recorridos conforman la base de datos para el modelo de topografía superficial representada en la respectiva carta. Asimismo la georreferenciación de todas la mediciones de Radar de espesor del Hielo permite generara los perfiles y modelos topográficos subglaciales en las cartas respectivas.

Capítulo 5

GENERACIÓN DE LA CARTOGRAFÍA GLACIAR

A partir de la recopilación de información tanto del glaciar Jotabeche, Juncal y Tyndall, se generó la cartografía correspondiente a la topografía superficial y subglacial, sobre la base del procesamiento de datos GPS y Radar, en complemento con la cartografía proporcionada por el Instituto Geográfico Militar (IGM) e imágenes satelitales SRTM.

5.1. Proyección, datum y escalas

5.1.1. Proyección universal, (UTM)

La proyección Universal Transversal de Mercator (UTM) es una proyección muy utilizada para la representación en mapas de la superficie terrestre tomando como base la proyección Gauss-Kruger.

Con el objetivo de evitar excesivos errores de escala o deformaciones en los bordes de cada huso, como consecuencia que la proyección UTM no es equidistante en el meridiano central, sino que aplica un factor de escala (K_0) de 0,9996.

Para que los valores numéricos de las coordenadas en cualquier cuadrante sean siempre positivos y aumenten en las direcciones Este y Norte, se considera como origen de cada sistema de coordenadas planas el Ecuador y el Meridiano Central, y se les asigna los valores Falso Este (FE) de 500.000 m y Falso Norte (FN) de 0 m para el hemisferio Norte y 10.000.000 m para el hemisferio Sur. La cuadrícula ortogonal UTM está formada por las paralelas a las proyecciones del Ecuador y del meridiano Central (MC).

El sistema (UTM), divide la Tierra entre las latitudes 84° Norte y 80° Sur en 60 husos de 6° de ancho en longitud. El meridiano de Greenwich, o meridiano 0, es el límite entre las

zonas 30 y 31. El caso de Chile continental, por su ubicación geográfica, se encuentra en los husos 18 (meridiano central de longitud -75°) y 19 (meridiano central de longitud -69°).

En relación a la descripción anterior, la cartografía para cada sector será:

- Glaciar Jotabeche y Juncal, Proyección UTM, Huso 19 (M.C 69°)
- Glaciar Tyndall, Proyección UTM, Huso 18 (M.C 72°)

5.1.2. Datum

Se define como el punto tangente al elipsoide y al geoide, donde ambos son coincidentes. Los sistemas de posicionamiento global GPS se basa en el Datum WGS84 que son las siglas de World Geodetic System, utilizando el elipsoide de referencia WGS84.

Por lo tanto el Datum de referencia para los tres aéreas estudiadas, zona central del glaciar Jotabeche, zona de ablación del glaciar Juncal Norte y zona de ablación del glaciar Tyndall es : Datum WGS84, elipsoide de referencia WGS84.

5.1.3. Escala

En tanto la escala en cada cartografía, se basó de acuerdo a la cantidad de información recopilada en cada una de las zonas de interes, por lo tanto:

- Escala 1 : 10.000 Glaciar Jotabeche y Juncal.
- Escala 1 : 50.000 Glaciar Tyndall

5.2. Visualización de puntos

La visualización de los puntos determinados en terreno, se realizó mediante el software “**Autocadland 2004®**”, que permite importar ficheros en formato ASCII, las cuales contienen las coordenadas y cotas respectivas de cada punto.

La información generada en el glaciar Jotabeche y Juncal fue mediante puntos medidos en las campañas realizadas el año 2008 como parte de este proyecto, en tanto el glaciar Tyndall los datos obtenidos en terreno fueron complementado con datos registrados en campañas anteriores realizadas por la Universidad de Magallanes en cooperación con el centro de Estudios del Cuaternario los año 2003 y 2004 [9] y por datos registrados en cooperación entre la Universidad de Magallanes, la Universidad de Münster y el Centro de Estudios Científico de Santiago, llevado a cabo en marzo del 2008.

5.3. Superficie y modelo tridimensional

5.3.1. Generación de un TIN

Una de las variables más importantes de Autocadland es sin duda, la posibilidad de generar superficies de terreno. En el caso del Glaciar Juncal y Tyndall se generó a partir de los puntos importados.

Se optó por utilizar el método **TIN**¹ para calcular el Modelo Digital del Terreno, y realizar una digitalización en detalle en las zonas de trabajo. El método de TIN genera una red irregular de triángulos, a partir de los puntos de medición.

El proceso completo de generación de un TIN es el siguiente:

1. Generación del diagrama de Voronoi: Se genera un número de polígonos proporcional al número de puntos medidos.
2. Triangulación de Delaunay: A partir de las mediatrices de los lados que definen los polígonos de Voronoi, se trazan semirrectas que unen los puntos muestrales, obteniendo una triangulación.

Las condiciones necesarias para que un TIN sea representativo de la topografía son:

- El número de triángulos ha de ser máximo
 - El área de los triángulos ha de ser mínima
 - Los triángulos han de ser lo más equiláteros posible
3. A partir de la red obtenida, la obtención, por interpolación, de la altitud de un punto Z_i en coordenadas (X_i, Y_i) dentro de un triángulo definido por sus vértices $(X_a, Y_a, Z_a; X_b, Y_b, Z_b; X_c, Y_c, Z_c)$ se calcula estableciendo la siguiente ecuación 5.1

$$Z_1 = AY_1 + BX_1 + C \quad , \quad (5.1)$$

A, B y C son valores definidos por las coordenadas de los vértices del triángulo. Este método supone que la altura varía linealmente dentro del triángulo.

4. Una vez obtenida la triangulación, se generó el Modelo Digital del Terreno, proyectando los vértices del TIN sobre una malla de paso M y N, inferior al área media de los triángulos dada por Land Desktop.

Para mejorar la proyección de las cotas de los vértices de los triángulos sobre una malla cuadrada, dado que la muestra de puntos fuente es una matriz rectangular con paso de malla constante, se ha optado por corregir esa redundancia de posiciones mediante un giro y una traslación del origen de la malla final. De esta manera, evitamos que coincidan los vértices de la malla con los de los triángulos.

¹Triangulated Irregular Network

5.3.2. Modelo Tridimensional

Los modelos tridimensionales fueron generados mediante el software Surfer 8.0®[®], en el cual se utilizó el método de interpolación de Krigging, Dicho método provee, a partir de una muestra de puntos, ya sean regular o irregularmente distribuidos, valores estimados de aquellos sitios donde no hay información, sin riesgo y con una varianza mínima conocida.

Los productos obtenidos por medio de las técnicas antes descritas estan contenidos en el ANEXO F.

Capítulo 6

REPRESENTACIÓN TRIDIMENSIONAL

Para construir la cartografía tridimensional de la superficie de los glaciares Jotabeche, Juncal Norte y Tyndall fue necesario realizar un modelo digital de elevación, DEM¹ de su terreno, es decir, una imagen en que las celdas de información que representan su superficie (i.e. píxeles) almacenan la altitud del terreno.

6.1. Selección y justificación del tipo de producto empleado

Un DEM puede ser derivado desde pares de imágenes estéreo obtenidas por sensores de tipo radar o multiespectral que contengan datos de posicionamiento RPC² que permitan derivar la elevación del terreno. En este caso se decidió trabajar con imágenes multiespectrales adquiridas por el sensor ASTER³ debido a tres principales ventajas:

1. La conveniente resolución espacial de 15 m. Esta es mejor o equivalente a la posible de obtener con imágenes de radar y supera con creces a aquella susceptible de obtener mediante un DEM derivado de curvas de nivel de la cartografía regular IGM (Instituto Geográfico Militar) o mediante el DEM de cobertura global generado por el proyecto SRTM (Shuttle Radar Topography Mission).
2. La disponibilidad de datos de archivo (i.e. imágenes que ya han sido adquiridas por el sensor) y la visita frecuente (aunque no regular) del satélite por las áreas de interés. Ello incrementa la posibilidad de conseguir imágenes libres de nubosidad y de alta calidad radiométrica y geométrica.

¹Digital Elevation Model

²Rational Polynomial Coefficients

³Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer

3. La adquisición casi simultánea de pares de las imágenes estereoscópicas. Dado que ambas imágenes estéreo son adquiridas sólo con una diferencia de segundos (en lugar de días como ocurre con otros sensores de tipo radar o multiespectrales), ellas están sujetas a idénticas condiciones ambientales y de iluminación, facilitando el corregistro espacial de ambas y la generación de imágenes epipolares.

Una imagen ASTER está compuesta de 14 bandas o porciones espectrales: cuatro en el visible e infrarrojo cercano (VNIR, visible and near infrared), seis en el infrarrojo de onda corta (SWIR, shortwave infrared) y cinco en el infrarrojo térmico (TIR, thermal infrared). Dentro de las bandas VNIR se encuentra el par estéreo, cuya resolución espacial es de 15 m, mientras que su resolución radiométrica es de 8 bits (i.e., cada banda codifica 255 niveles de radiancia).

La tabla 6.1 muestra la fecha de adquisición de las imágenes ASTER empleadas para cada una de las áreas de estudio. En todos los casos fueron seleccionada las imágenes más recientes disponibles libres total o parcialmente de nubosidad.

Area Estudio	Imagenes que cubre el ares de estudio	Fecha de adquisicion de las imagenes
Glaciar Tyndall	Parte superior del glaciar	20 de Febrero de 2005
	Parte inferior del glaciar	20 de Febrero de 2005
	Parte inferior de la lengua del glaciar	7 de Septiembre de 2005
	del glaciar	de 2005
Glaciar Juncall	1	12 de Enero de 2009
Glaciar Jotabeche	1	13 de Diciembre 2006

Cuadro 6.1: Fecha de adquisición de las imágenes empleadas para cada área de estudio

6.1.1. Generación del DEM

En primer lugar sobre los pares estéreos correspondientes a cada una de las áreas de interés fueron localizados no menos de 30 puntos críticos a partir de los RPC's (Rational Positional Coefficients) contenidos en sus respectivos archivos auxiliares, con el propósito de crear pares de imágenes epipolares que dieran cuenta de la relación geométrica del respectivo par estéreo. La conjugación o calce de cada par de imágenes epipolares fue realizado con un error posicional inferior a un píxel y a partir de ellas fue obtenida una imagen de paralaje que permitió geocodificar el DEM derivado desde su respectivo par estéreo. En este procedimiento fue empleado una transformación polinomial y un remuestreo de vecino más cercano con resolución espacial de 15 m.

Con el propósito de generar un DEM con valores absolutos lo más próximos a la realidad posible y con precisiones geométricas del orden de 15 m (horizontal y vertical), entre 25 y 35 puntos de control fueron seleccionados sobre cada par de imágenes estéreo, los que fueron empleados al momento de geocodificar el DEM.

Las coordenadas X e Y de los puntos de control de cada área de interés fueron obtenidas de la misma imagen ASTER, que se encuentra georreferenciada mediante un método de posicionamiento directo (los parámetros de proyección son recogidos por el sensor a su paso por el área de interés) con coordenadas geográficas UTM, datum WGS 84, huso 19 Sur. La coordenada Z (elevación) de los puntos de control fue tomada del DEM SRTM.

Dado que el glaciar Tyndall se compone de tres imágenes ASTER, una vez generado el DEM de cada una de ellas fue necesario confeccionar un mosaico controlado, es decir, una unión de los tres DEMs basada en sus coordenadas geográficas.

Cada DEM se creó con en el software procesador de imágenes ENVI® y almacenado en un archivo de imagen de extensión TIFF, de manera que sea legible en cualquier software de despliegue y procesamiento de imágenes.

6.1.2. Elaboración cartográfica

La imagen en falso color, el DEM y la representación tridimensional de cada glaciar se dispuso en una cartografía que incluyó grilla geográfica, escala gráfica, norte, dimensiones y altitudes relevantes del área de estudio y viñetas con información técnica relevante. Estos productos se crearon en el software de información geográfica Arcview© y almacenados en archivos de imagen de extensión JPG, de manera que sean legibles en cualquier software de despliegue y procesamiento de imágenes. Los productos obtenidos por medio de las técnicas antes descritas están contenidos en el Anexo G

6.1.3. Ventajas de un DEM derivado de un par estéreo de imágenes ASTER

- Precisión geométrica: Dado que en su paso por un área dada el satélite ASTER adquiere los parámetros de proyección geográfica y órbita satelital que permiten georreferenciar instantáneamente la imagen adquirida, el DEM derivado desde ella cuenta con una alta precisión geométrica, es decir, los errores de desplazamiento geográfico son inferiores a 15 m.
- Resolución espacial: El par estéreo de imágenes ASTER permite extraer un DEM de 15 m de resolución espacial, que a través de la cartografía regular topográfica IGM y de otras imágenes de radar no es posible de obtener.
- Frecuencia temporal: Dado que el sensor ASTER orbita continuamente la tierra es posible solicitar la adquisición de imágenes de áreas de interés en fechas seleccionadas por el usuario o bien disponer de imágenes adquiridas años atrás (las imágenes ASTER más antiguas corresponden a Diciembre de 1999, fecha en que fue lanzado el satélite Terra que transporta al sensor), lo que posibilita la comparación temporal de DEMs de un área dada con propósitos de detección de cambio temporal de variables (e.g. topografía superficial).
- Post-procesamiento: A través del empleo de software especializados es posible mejorar continuamente la calidad altimétrica del DEM ASTER mediante la incorporación de nuevos puntos de control levantados en terreno con una alta precisión geométrica. Ello resulta particularmente útil para mejorar áreas que poseen valores de altitud imprecisos debido a inconsistencias en la lectura de parámetros por parte del sensor o a condiciones de observación adversas (e.g. nubosidad, sombras) al momento de adquisición de la imagen.

Capítulo 7

ESTIMACIÓN DE LOS VOLÚMENES DE HIELO EQUIVALENTES EN AGUA

7.1. Estimación del volúmen de hielo del glaciar Jotabeche

Para estimar el volúmen de hielo del glaciar Jotabeche se asumió una geomorfología, constituida de una depresión central, un umbral, y una zona por la que el hielo se desborda y desplaza en forma simétrica y concéntrica con respecto a la depresión. En el sector central de la depresión se obtuvieron dos mediciones puntuales de la profundidad del hielo utilizando técnicas de radio eco sondaje, obteniendo una profundidad promedio estimada de $40 \pm 20\%$ metros de espesor, por ello se consideró un perfil transversal al flujo glaciar en "U" o artesa, que se aproximó a una parábola y cuyo vértice se fijó en la zona central del glaciar. Por medio del software Grapher® se simuló la zona del glaciar estudiada, asumiendo que el glaciar esta compuesto de dos funciones parabólicas, que se entrecruzan y cuya vista de planta forma un rectángulo de 180 m de ancho por 540 m de largo de acuerdo a la figura 7.1 abarcando un área total de $97.200 m^2$. Para determinar el volúmen se interceptaron las funciones representativas del glaciar como se muestra en la figura 7.2, luego se integró cada una de las regiones por medio del cálculo numérico Runge Kutta de orden 4 permitiendo obtener una diferencia entre las dos regiones, estimando el valor de $2,8383 \times 10^6 m^3$ de hielo como de muestra en la expresión 7.1, .

$$V_{Hielo} = 2,8383 \times 10^6 (m^3) \quad (7.1)$$

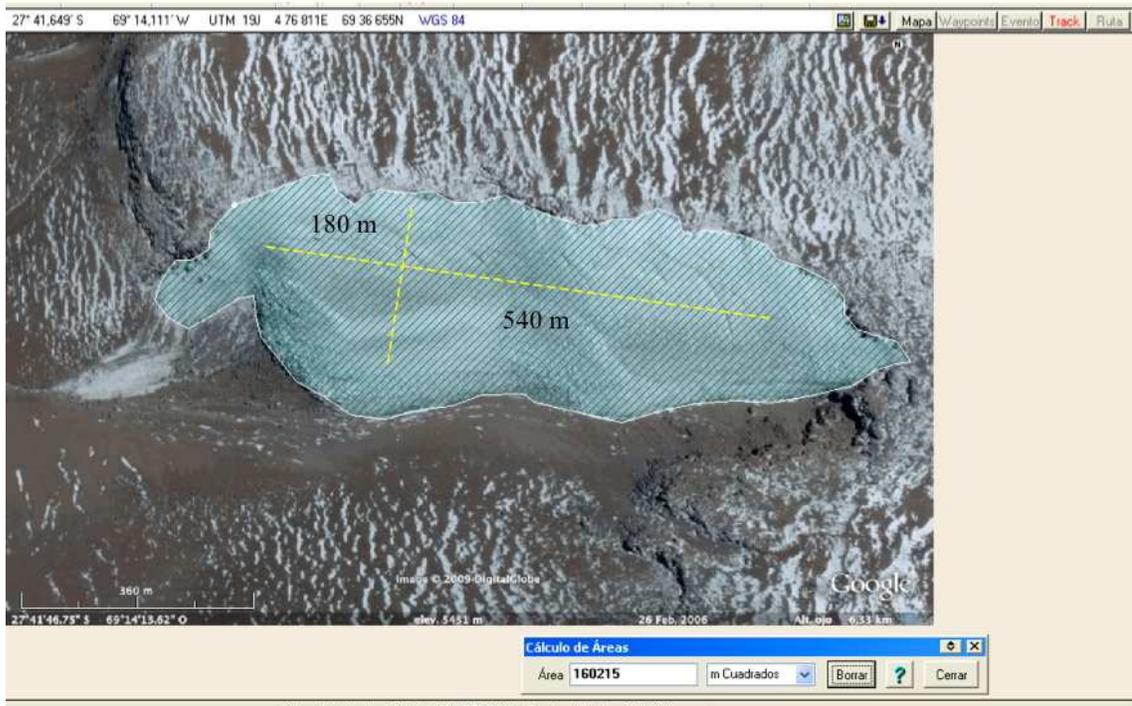


Figura 7.1: Área de estudio sobre del glaciar Jotabeche

Por otra parte el agua al pasar a estado sólido aumenta de volúmen. Esto sucede porque la densidad ¹ del hielo es menor que la del agua². Para determinar la densidad relativa es necesario conocer la densidad del hielo en esa zona, para ello se asumió una densidad relativa del hielo de 885 kg/m^3 de acuerdo a la estimación realizada a 5538 m.s.n.m. sobre el cerro Tapado y aproximadamente a 26 metros de profundidad [11]. De otra forma para estimar el volúmen de hielo equivalente en agua, podrá obtenerse utilizando la densidad relativa de acuerdo a la expresión 7.3.

$$\frac{\rho_{Hielo}}{\rho_{Agua}} = \frac{885}{1000} \quad (7.2)$$

$$\rho_{relativo} = 0,885 \quad (7.3)$$

$$V_{Agua_{Jotabeche}} = 0,885 \times 2,8383 \times 10^6 \quad (7.4)$$

¹La densidad expresa la masa por unidad de volúmen

²Densidad del agua destilada a 4°C: 1000 kg/m^3

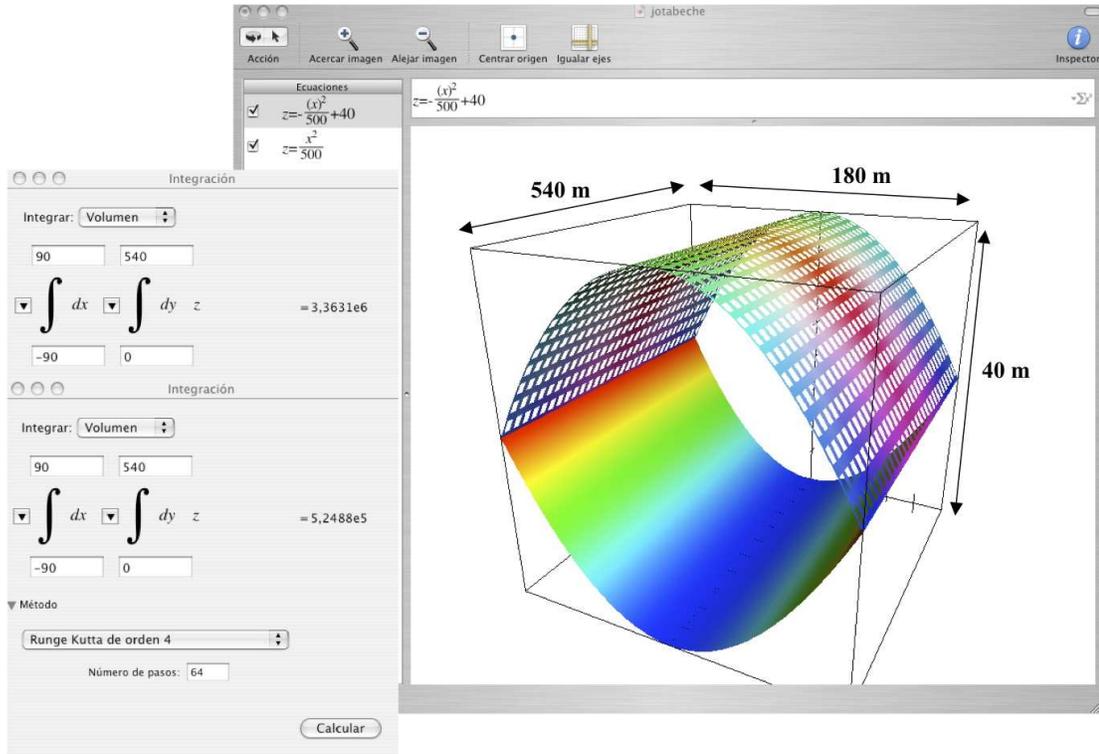


Figura 7.2: Modelo utilizado para obtener el volúmen de hielo en el glaciar Jotabeche

por lo tanto la estimación del volúmen de hielo equivalente en agua del glaciar Jotabeche será

$$V_{\text{Agua}_{\text{Jotabeche}}} = 2,5119 \times 10^6 \text{ (m}^3\text{)} \quad (7.5)$$

7.2. Estimación del volúmen de hielo en un sector del glaciar Juncal Norte

Para estimar el volúmen del sector estudiado sobre el glaciar Juncal Norte, correspondiente a un sector de la zona de ablación, se asumió una geomorfología tal que su lengua fluye sobre un fondo con un perfil transversal en forma "U" o artesa. Para realizar los cálculos se asumió, además que éste fluye en forma simétrica y concéntrica con respecto al fondo y que su profundidad promedio es de 180 m de acuerdo a lo estimado mediante radio eco sondaje, como se muestra en la figura 3.11. A través del software Grapher® se simuló la zona del glaciar estudiada, asumiendo que el glaciar está compuesto de dos funciones parabólicas, que se entrecruzan y cuya vista en planta se puede asimilar a un rectángulo de 500 m de ancho por 1000 m de largo de acuerdo a la figura 7.3 abarcando un área total de 500000 m^2 . Luego se integró cada una de las funciones parabólicas por medio del cálculo numérico Runge Kutta de orden 4 permitiendo obtener una diferencia entre las dos regiones, estimando un volúmen

de hielo de $59,85 \times 10^6 \text{ m}^3$.

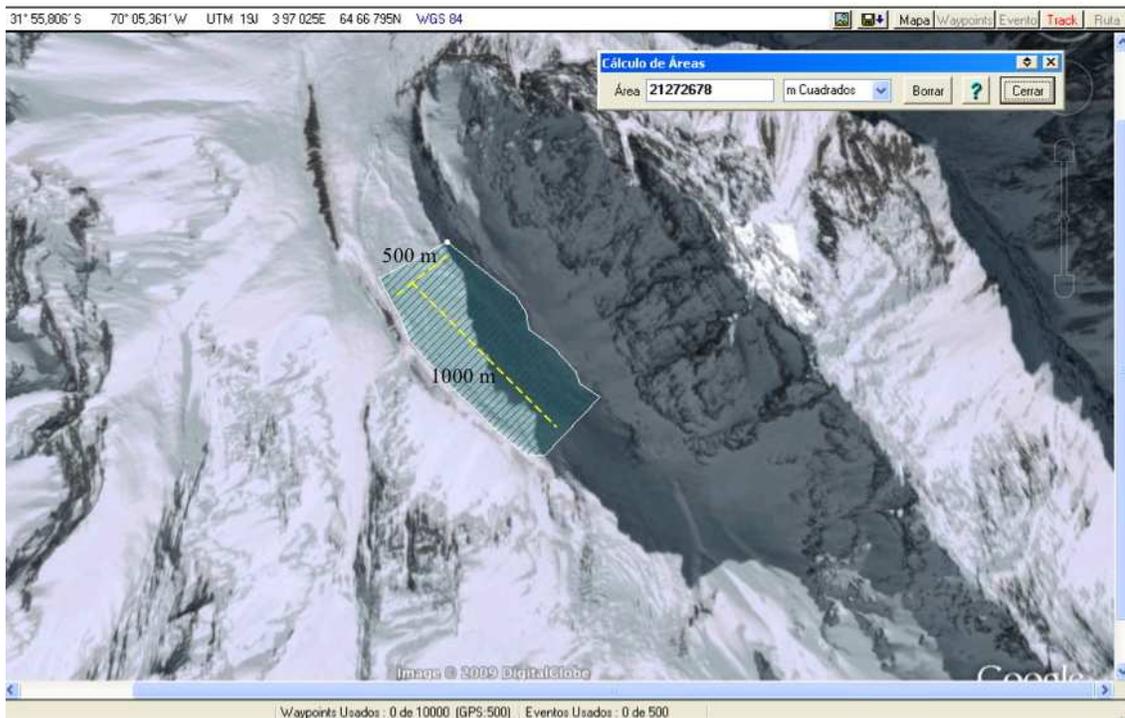


Figura 7.3: Área de estudio de la masa de hielo del glaciar Juncal Norte

$$V_{Hielo} = 59,85 \times 10^6 \text{ (m}^3\text{)} \quad (7.6)$$

Para determinar el volúmen de hielo equivalente en agua se asumió una densidad relativa del hielo de 900 kg/m^3 [20]. De esta forma el volúmen de hielo equivalente en agua, podrá ser estimado utilizando la densidad relativa como se muestra en la expresión 7.8

$$\frac{\rho_{Hielo}}{\rho_{Agua}} = \frac{900}{1000} \quad (7.7)$$

$$\rho_{relativo} = 0,90 \quad (7.8)$$

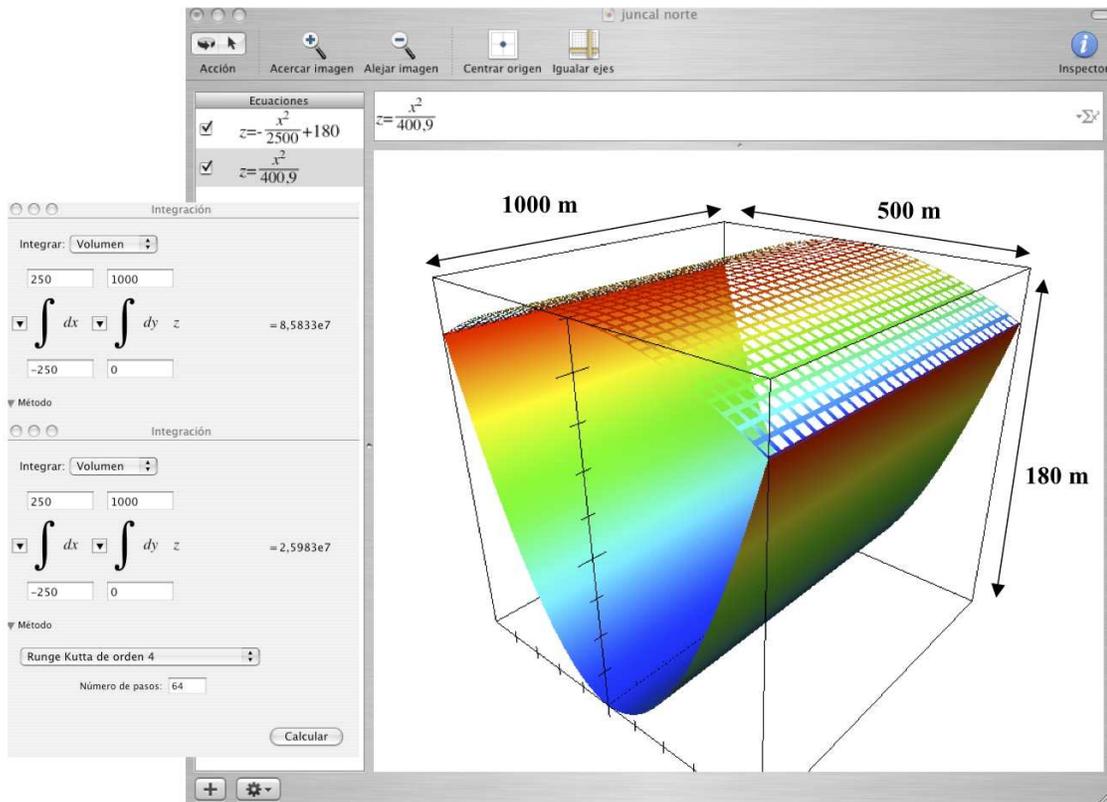


Figura 7.4: Modelo utilizado para obtener el volúmen de la masa de hielo del glaciar Juncal Norte

$$V_{Agua_{Juncal}} = 0,90 \times 59,85 \times 10^6 \quad (7.9)$$

por lo tanto la estimación del volúmen de hielo equivalente en agua del glaciar Juncal Norte será

$$V_{Agua_{Juncal}} = 53,87 \times 10^6 \text{ (m}^3\text{)} \quad (7.10)$$

7.3. Estimación del volúmen de hielo de un sector del glaciar Tyndall

Para estimar el volúmen del hielo estudiado en un sector del glaciar Tyndall se asumió que el glaciar fluye en forma simétrica y concéntrica con respecto al valle y asumiendo que posee una geomorfología glaciar constituida de una depresión central en forma de "U" o artesa, que se aproximó a una parábola y cuyo vértice se fijó en la zona central del glaciar. El volúmen total se estimó asumiendo tres áreas rectangulares con una profundidad promedio de acuerdo a las mediciones obtenidas en terreno. El primer sector es un rectángulo de 4200 m de ancho por 9500 m de largo con una profundidad promedio de 503 m , el segundo sector es un rectángulo de 4800 m de ancho por 9000 m de largo y una profundidad promedio de 323 m, el tercer sector es un rectángulo de 2100 m de ancho por 4500 m de largo y una profundidad promedio de 279 m. En general el área total estudiada se estimó en $92,55 \text{ km}^2$, de acuerdo a la figura 7.5.

Para determinar el volúmen total de hielo, se calculó en cada uno de los sectores su volúmen. Por cada área se obtuvieron las funciones representativas del volúmen como se muestra en las figuras 7.6, 7.7, y 7.8 respectivamente. Para luego aplicar el cálculo numérico Runge Kutta de orden 4 que permitió estimar un volúmen de hielo total del sector en estudio, como se muestra en la expresión 7.12. .

$$V_{Hielo} = 13,358 \times 10^9 + 12,808 \times 10^9 + 1,7568 \times 10^9 \quad (7.11)$$

$$V_{Hielo} = 27923 \times 10^6 \text{ (m}^3\text{)} \quad (7.12)$$

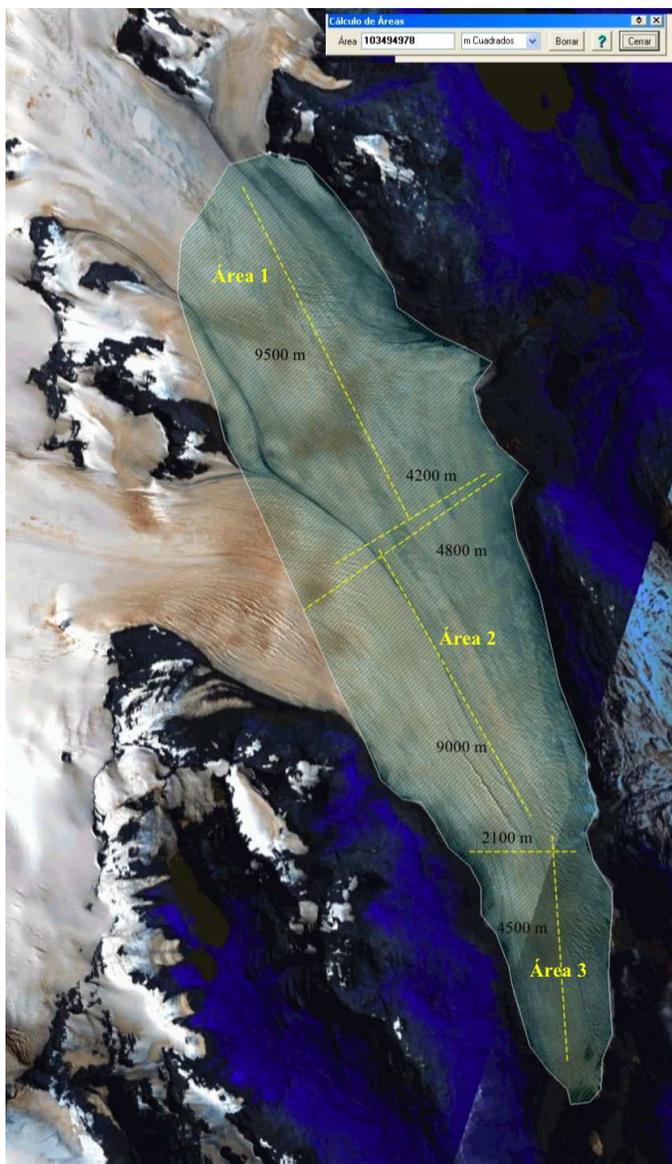


Figura 7.5: Áreas de estudio ubicadas sobre la masa de hielo del glaciar Tyndall

Para determinar el volúmen de hielo equivalente en agua se asumió una densidad relativa del hielo de 900 kg/m^3 [22] para las tres áreas de estudio. De esta forma el volúmen de hielo equivalente en agua, podrá ser estimada utilizando la densidad relativa como se muestra en la expresión 7.14.

$$\frac{\rho_{Hielo}}{\rho_{Agua}} = \frac{900}{1000} \quad (7.13)$$

$$\rho_{relativo} = 0,90 \quad (7.14)$$

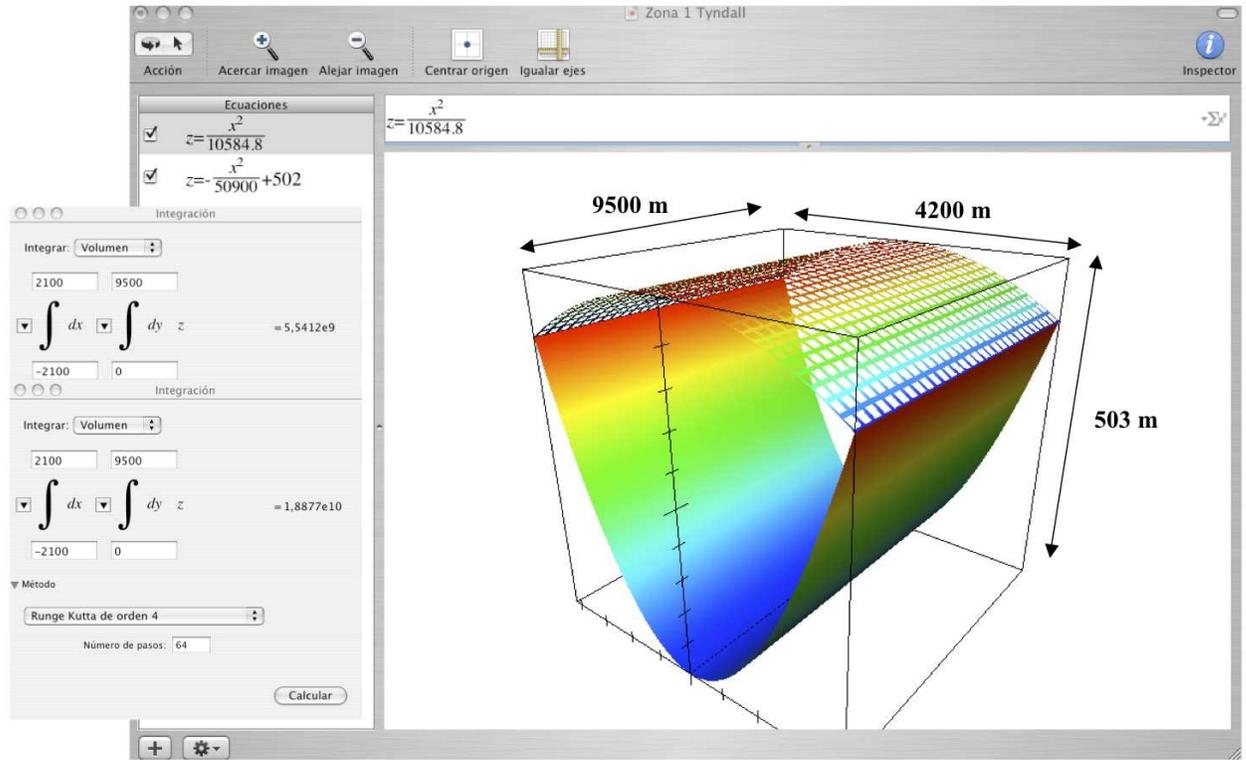


Figura 7.6: Modelo utilizado para obtener el volúmen de la masa de hielo del área 1, sobre el glaciar Tyndall

$$V_{AguarTyndall} = 0,90 \times 27923 \times 10^6 \quad (7.15)$$

por lo tanto la estimación del volúmen de hielo equivalente en agua del glaciar Tyndall será

$$V_{AguarTyndall} = 25130 \times 10^6 \text{ (m}^3\text{)} \quad (7.16)$$

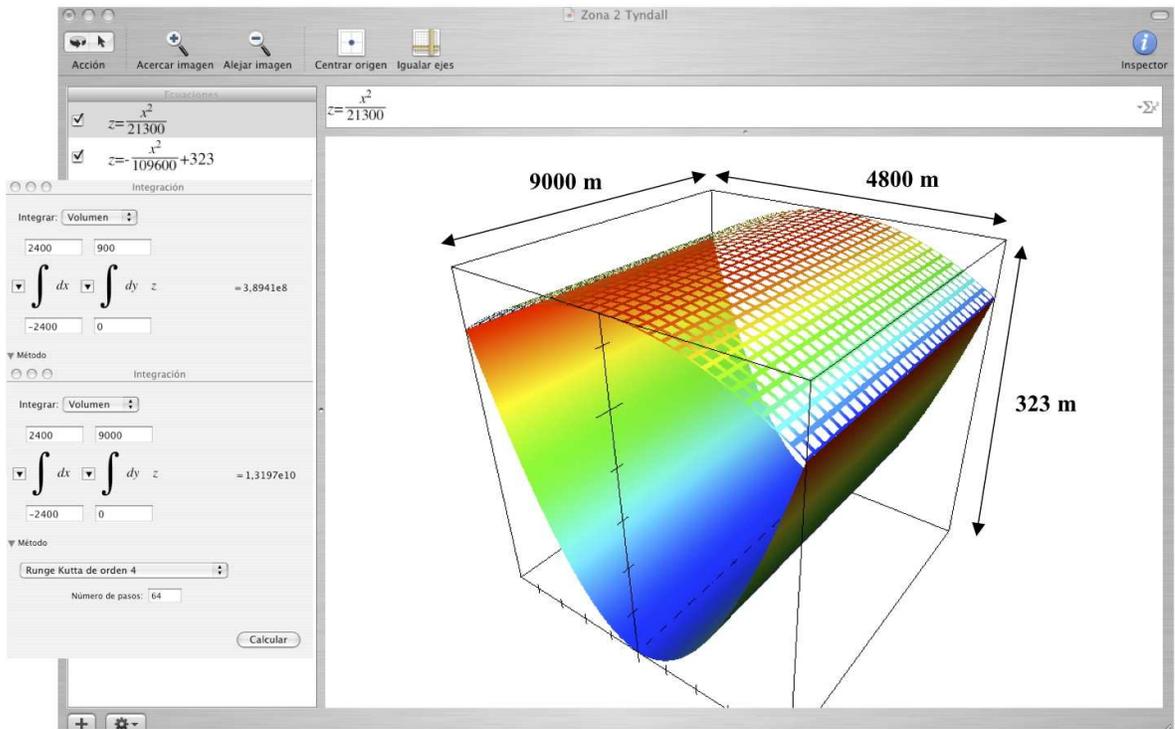


Figura 7.7: Modelo utilizado para obtener el volúmen de la masa de hielo del área 2, sobre el glaciar Tyndall

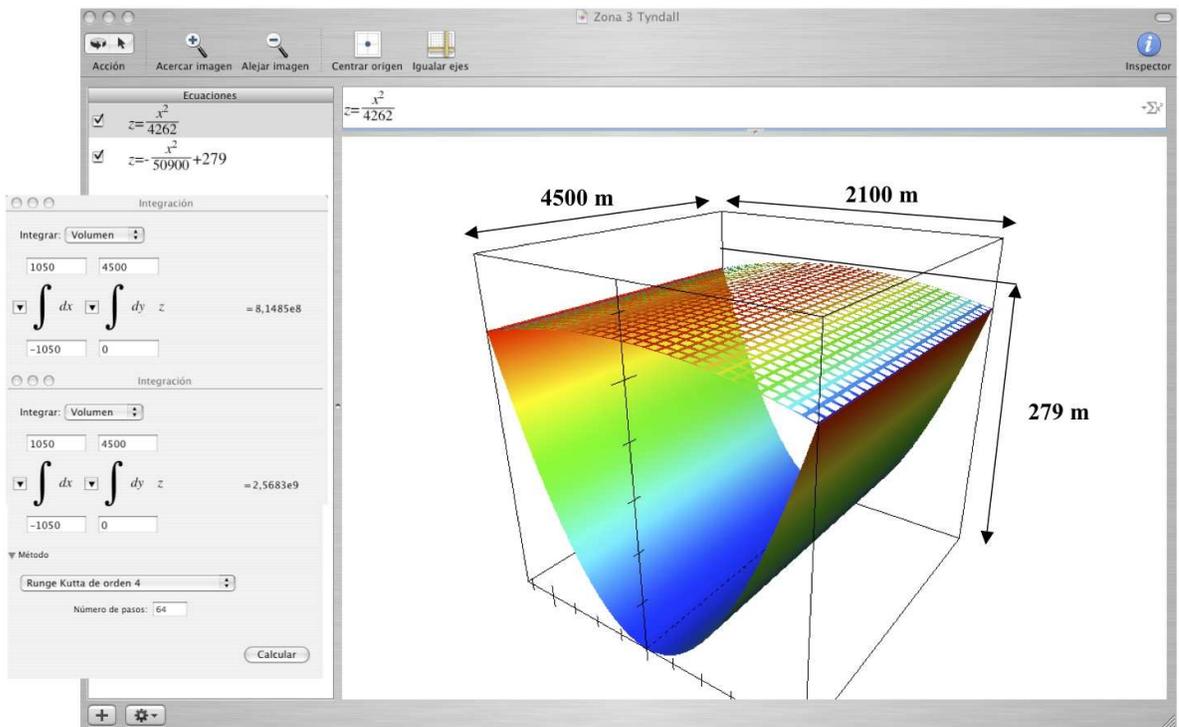


Figura 7.8: Modelo utilizado para obtener el volúmen de la masa de hielo del área 3, sobre el glaciar Tyndall

Capítulo 8

TRABAJO AUDIOVISUAL

En forma adicional al proyecto de investigación se contempló iniciar un programa piloto educativo en formato audiovisual relacionado con el tema agua y orientado a dar a conocer la importancia de este vital elemento. El concepto general es descrito a continuación junto al contenido del material audiovisual elaborado.

8.1. Programa audiovisual Pilares del Agua

El Agua fresca es nuestro recurso máspreciado, distribuye toda la vida terrenal. Este recurso escaso debe enfrentar en forma permanente una fuerte e insostenible demanda de usuarios de todo tipo. Los usos ambientales del agua, que pueden ser clave para asegurar la sustentabilidad de la oferta de agua en la tierra en el largo plazo, son con frecuencia objeto de mínima atención.

En las últimas décadas, gran parte de los glaciares, del país se encuentran en retroceso y salvo algunas excepciones se encuentran en equilibrio e incluso avance. El retroceso ocurre principalmente en respuesta al calentamiento atmosférico y una posible disminución en la precipitación durante el último siglo. Para determinar estos cambios sobre los glaciares es necesario realizar estudios de balance de masa, que deberán tener en cuenta la adquisición de datos de terrenos sobre diferentes zonas del glaciar.

Es por ello y cumpliendo con los requerimientos del convenio establecido entre la Universidad de Magallanes (UMAG) y la Dirección General de Aguas (DGA) que tiene como objetivo desarrollar estudios científicos y técnicos específicos en las zonas de interés correspondientes al Norte Chico y Zona Central de Chile como así también un sector del Campo de Hielo sur (CHS). La Universidad de Magallanes (UMAG), la cual tiene un amplio conocimiento y prestigio en estudios glaciológicos de esta naturaleza desarrolló las actividades propuestas de acuerdo a las bases técnicas establecidas y al mismo tiempo creó una herramienta audiovisual que se incluye en el informe de carácter informativo y educativo que

destaca fundamentalmente el significado de la preocupación por el elemento Agua.

En esta oportunidad el documento audiovisual denominado **Pilares del Agua** hace un recorrido a través de una maqueta de presentación con los siguientes temas:

1. **EL AGUA Y EL PLANETA:** Se demuestra una visión de cómo el Planeta fue evolucionando siendo moldeado por la presencia del agua en sus diversas formas en los orígenes de las tierras altas.
2. **ESTRUCTURA DEL AGUA:** En este capítulo se da a conocer fundamentalmente como la molécula del agua se manifiesta bajo precisas estructuras atmosféricas y ambientales.
3. **EL CICLO DEL AGUA:** Siempre en términos educativos se destaca el viaje vital del agua considerando su nacimiento desde las altas montañas hasta su recorrido hacia el mar y de allí sin cortar vínculo con la atmosfera.
4. **CHILE, UN PAÍS RICO EN RECURSOS HÍDRICOS:** Con la aparición de conceptos como la estrecha relación hidro-social entre las comunidades y su entorno acuífero, su cuidado, la contaminación y el desarrollo de una educación.
5. **EL AGUA Y LA CIENCIA:** En este capítulo, se destaca principalmente las estrategias y labores realizadas por la Dirección General de Aguas y su vinculación estratégica con la Universidad de Magallanes para efectuar las actividades de carácter técnico en el terreno propiamente tal.
6. **UNA CULTURA DEL AGUA:** Con una visión amplia de País ambas instituciones DGA - UMAG se han propuesto llegar al fondo cultural y de educación de la población en el tema del Agua. Para ello es necesario continuar con esta estrategia de esquematizar planes, programas, resultados y estadísticas concentradas en medios audiovisuales en que destaque las actividades propias de los proyectos y con las acciones de sus propios protagonistas.

Se adjunta material audiovisual denominado PILARES DEL AGUA , Anexo H

Capítulo 9

CONCLUSIONES.

En esta acción de apoyo se desarrollaron tres campañas científicas de terreno en tres glaciares específicos, orientadas a determinar espesores de hielo sobre transectas en dos glaciares, el glaciar Jotabeche ubicado en la zona del Norte Chico y el glaciar Juncal Norte ubicado en la zona Central con el objetivo de estimar los volúmenes de hielo equivalentes en agua respectivamente. El tercer glaciar en estudio corresponde al glaciar Tyndall ubicado en el Campo de Hielo Sur, región de Magallanes y cuyo objetivo principal está orientado a comenzar los estudios que permitan estimar a mediano plazo el balance glaciológico y su contribución a la escorrentía superficial de su cuenca.

Sobre estos tres glaciares se realizaron mediciones utilizando un sistema de radar con el objetivo de obtener las topografías subglaciares de cada uno de los glaciares en complemento con equipos GPS's de georeferenciación que permitan determinar la topografía superficial, junto con georeferenciar el total de la información recolectada por el radar. El funcionamiento del sistema de radar como el de los equipos de GPS's de georeferenciación resultaron satisfactorios en su funcionamiento, permitiendo obtener características importantes de las tres zonas englacadas involucradas en este estudio.

Se realizaron estimaciones de volúmenes de hielo equivalentes en agua en las tres zonas de estudio utilizando software para realizar las aproximaciones. En el glaciar Jotabeche se asumió una geomorfología constituida de una depresión central, un umbral, y una zona por la que el hielo se desborda y desplaza en forma simétrica y concéntrica con respecto a la depresión. En la zona de ablación del glaciar Juncal Norte se asumió una geomorfología tal que su lengua fluye sobre un fondo con un perfil transversal en forma de U o artesa. Para realizar los cálculos se asumió, además que éste fluye en forma simétrica y concéntrica con respecto al fondo y que su profundidad promedio es de 180 m. En el glaciar Tyndall se asumió que el glaciar fluye en forma simétrica y concéntrica con respecto al valle y que posee una geomorfología glaciaria constituida de una depresión central en forma de U o artesa, que se aproximó a una parábola y cuyo vértice se fijó en la zona central del glaciar.

En el área del glaciar Jotabeche el uso del sistemas de radar permitió determinar el espesor del glaciar en dos punto específicos denominados J03 y J04 (carta Jotabeche ANEXO F) a una cota aproximada de 5400 m.s.n.m. correspondiente a 40 metros de espesor, cabe destacar que esta información es inédita y que permitirá estimar en forma aproximada el volúmen de hielo equivalente en agua.

En la zona de ablación del glaciar Juncal Norte fue posible obtener la topografía superficial y subglaciar de una área aproximada de 1,2 Km², mediante el procesamiento datos GPS y Radar en complemento con la cartografía del Instituto Geográfico Militar (IGM). En cuanto a la información recopilada mediante el sistema de radar y GPS se obtuvo un perfil longitudinal y 9 perfiles transversales los que permitieron generar un carta tridimensional del sector (carta Juncal ANEXO F). El máximo espesor medido corresponde aproximadamente a a 240 metros ubicados en la transecta T07- T08 presentando un aumento de espesor a mayor altitud.

El resultado del procesamiento de datos GPS indica que las magnitudes de la velocidad horizontal alcanza aproximadamente 32 cm/día. Las líneas base medidas y procesadas durante el presente estudio, arrojaron generalmente precisiones del orden centimétrico en sus componentes planimétricos y altimétricos respectivamente como también el procesamiento de los datos registrados en modo “**Stop & Go**”.

Las mediciones realizadas sobre el glaciar Tyndall mediante GPS y Radar permitieron establecer topografía superficial y subglaciar de una transecta de aproximadamente 3,2 Km. de longitud comenzando desde el borde rocoso en dirección hacia el centro del glaciar. Se obtuvieron registros que indican claramente retornos del fondo rocoso. Los resultados obtenidos oscilan entre los 126 metros y 548 metros cuyo máximo espesor fue obtenido sobre la baliza B06, mas allá de este punto no fue posible determinar la topografía subglaciar, este problema puede ser atribuible a la falta de ganancia en la escala de amplitud vertical, sin embargo fue posible generar un perfil de la transecta donde es posible visualizar el lecho rocoso como así también la topografía superficial del glaciar (Figura 3.13). Esta información coincide con datos obtenidos en campañas anteriores.

En forma complementaria a la obtenida en la campaña de terreno realizada al glaciar Tyndall se utilizó información adquirida por la Universidad de Magallanes en cooperación con el centro de Estudios del Cuaternario los año 2003 y 2004 y por datos registrados en cooperación entre la Universidad de Magallanes, la Universidad de Münster y el Centro de Estudios Científico de Santiago, llevado a cabo en marzo del 2008, permitiendo generar un modelo tridimensional de la topografía subglaciar y superficial del glaciar Tyndall. Este modelo muestra las características principales de la topografía del lecho rocoso por donde fluye el glaciar permitiendo apreciar profundidades que superan los 730 metros en algunos sectores a través de su corredor central.

Para el caso del glaciar Jotabeche se obtuvo un volúmen aproximado de hielo equivalente en agua de $2,5119 \times 10^6$ m³; para el glaciar Juncal Norte un volúmen de $53,87 \times 10^6$ m³ y finalmente el volúmen de hielo equivalente en agua para el glaciar Tyndall fue de 25130×10^6 m³.

Para el estudio de la dinámica en el sector de ablación del glaciar Tyndall se instalaron 8 balizas sobre una transecta de 3,2 Km de longitud con el objetivo de estimar la velocidad de desplazamiento, dirección del movimiento superficial del glaciar y determinar el estado del balance de masa del área. Cada baliza fue instalada en el interior del hielo glaciar y georeferenciada para el monitoreo con respecto a la altura y posición de cada una de ellas en una futura expedición.

Con el objetivo de obtener una mejor caracterización física de las zonas de estudio se trabajó en la construcción de cartografía superficial tridimensional de cada zona a partir de imágenes satelitales generando un modelo digital de elevación de cada área (DEM, digital elevation model). Estos modelos permitieron obtener una representación espacial con una resolución de 15 metros generada desde pares estéreo de imágenes ASTER las cuales permiten extraer esta resolución espacial superando por ejemplo a los modelos construidos a partir de un DEM derivado desde curvas de nivel de la cartografía regular del Instituto Geográfico Militar , IGM. Como complemento al trabajo de investigación se generó material de apoyo con el objetivo de iniciar un programa piloto educativo en formato audiovisual relacionado con el tema agua orientado a dar a conocer la importancia de este vital elemento.

Capítulo 10

RECOMENDACIONES

Los estudios realizados en las tres zonas representan el inicio de un trabajo sistemático que permitirá a corto y mediano plazo obtener información relevante en diferentes aspectos desde el punto de vista glaciológico, por ello es de suma importancia continuar con las investigaciones, sumando esfuerzos para obtener resultados que permitan conocer más de nuestra realidad glaciológica e hídrica nacional.

Se hace necesario un programa de monitoreo de glaciares que aseguren las visitas periódicas a terreno con el objetivo de obtener información regular del comportamiento de las masas glaciares y sus variaciones utilizando diferentes métodos para determinar cuales son los principales factores que afectan la dinámica glaciaria sobre cada uno de los sectores en estudio y su relación con el cambio climático.

Las ventajas de utilizar imágenes satelitales en estudios como el que se está desarrollando son muy promisorias, debido a la característica intrínseca de la imagen, que permite generar una serie de productos muy interesantes y complementarios en el estudio de la dinámica de glaciares como lo es por ejemplo el análisis de la temperatura a nivel superficial o albedo, parámetros de gran relevancia en el cálculo de balance de energía. La utilización de modelos de elevación o DEMs posibilitan la comparación temporal de área dada con propósitos de detección de cambio temporal de variables (e.g. topografía superficial). Por ello incluir a futuro estas técnicas permitirán obtener resultados a corto plazo y por otro lado a través del empleo de software especializados es posible mejorar continuamente la calidad altimétrica del DEM ASTER mediante la incorporación de nuevos puntos de control levantados en terreno con un alta precisión geométrica.

Bibliografía

- [1] ANALOG DEVICES CATALOG, Online unter: <http://www.analog.com/en/prod/0,770843AD9858,00.html>, Stand 14.03.2006.
- [2] BAUMGARTNER, Albert; LIEBSCHNER, Hans-Jürgen: *Allgemeine Hydrologie*. Gebrüder Borntraeger, 1996, 694 p.
- [3] BOGORODSKY, V.V.; BENTLEY, C.R and GUDMANDSEN, P. E. : *Radioglaciology*. D. Reidel Publishing Company, 1985.
- [4] BYRON, Edde: *Radar, Principle, Technology, Applications*. PTR Prentice Hall, Inc., 1993, 717 p.
- [5] CÁRDENAS, Ramón : *Trabajo de titulación: Uso de un sistema digital de radar, altimetría láser, video y fotografía a bordo de un avión para medir propiedades de glaciares* Universidad de Magallanes, 2002. 90 p
- [6] CASASSA, Gino; DAMM, Volkmar; EISENBURGER, Dieter; JENETT, Martin, CÁRDENAS, Carlos; ACUÑA, Cesar; RIVERA, Andrés and LANGE, Heiner : *Estudios glaciológicos en patagonia y Chile central utilizando un sistema aerotransportado de radio eco sondaje* Anales del Instituto de la Patagonia, Serie Cs, Nat. (Chile), 2001, Vol. 29:25-44.
- [7] CASASSA, Gino; RIVERA, Andrés, ANIYA, Masamu, and NARUSE, Renji: *Características glaciológicas del campo de Hielo Patagónico Sur* Anales del Instituto de la Patagonia, Serie Cs, Nat. (Chile), 2000, Vol. 28:5-22.
- [8] CASASSA, Gino: *Radio Echo sounding of Tyndall Glacier, southern Patagonia*, Bulletin of Glacier Research, 1992 10, 69-74.
- [9] CARVALLO, Rubén., (2003): *Informe Expedición Tyndall 2004, Estudios Glaciológicos en la Zona de Ablación del glaciar Tyndall, Parque Nacional Torres del Paine* 2004.
- [10] *CUMBRE DE JOHANNESBURG (2002)*: press official notice, August 26 of 2002.
- [11] GONIT P., C. KULL., U. SCHOTTERER, M . SCHWIKOWSKI and H. W. GÄGGLER (2006): *Glacier mass balance reconstruction by sublimation induced enrichment of chemical species on Cerro Tapado (Chilean Andes)*, Clim Past, 2. 21-30.
- [12] DIRECCION GENERAL DE AGUAS *Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad, Cuenca del río Copiapó, 2004, 122 p.*

- [13] DIRECCION GENERAL DE AGUAS *Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad, Cuenca del río Aconcagua, 2004, 160 p.*
- [14] DIRECCION GENERAL DE AGUAS *Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad, Cuenca del río Serrano, 2004, 95 p.*
- [15] GRAHAM M.: *Understanding Millimetre FMCW Radars*, International Conference on Sensing and Technology, 2005.
- [16] HODGE, S.M. 1978. *USGS mono-pulse radar report, 1978, 9 pp*, unpublished.
- [17] KINGSLEY, Simon; QUEGAN, Shuan: *Understanding Radar Systems*. Mcgraw-Hill, 1992.
- [18] KORZUN, V.: *World water balance and water resources of the earth*, UNESCO, 1978, 663 p.
- [19] PATERSON, W.S.B.: *The physics of glaciers*. Pergamon Press Ltd., 1981, 481 p.
- [20] PELLICCIOTTI, Francesca; HELBING, Jakob; RIVERA, Andrés; FAVIER, Vincent; CORRIPIO, Javier; ARAOS, José; SICART, Jean-Emmanuel; and CARENZO, Marco (2008): *A study of the energy balance and melt regime on Juncal Norte Glacier, semi-arid Andes of central Chile, using melt models of different complexity*, Hydrological Processes , 22. 3980-3997.
- [21] PECOLLICCIOTTI, Francesca; BROCK, Ben; STRASSER, Ulrich; BURLANDO, Paolo; FUNH, Martin and CORRIPIO, Javier (2005) *An enhanced temperature-index glacier melt model including the shortwave radiation balance: development and testing for Haut Glacier d’Arolla, Switzerland* J. Glaciology, 51 (175), 573-587.
- [22] TAKEUCHI, Yukari; NARUSE, Renji; SATOW, Kazuhide (1995): *Characteristics of heat balance and ablation on Moreno and Tyndall glaciers, Patagonia, in the summer 1993/94*, Bulletin of Glacier Research 13 (1995) 45-46
- [23] NARUSE, Renji; PEÑA, Humberto; ANIYA, Masamu and INOUE, Jiro (1987) : *Flow and surface structure of Tyndall Glacier, The Southern Patagonia Icefiels* Bulletin of Glacier Research 4 (1987) 133-140.
- [24] NOON, Davis Andrew.: *thesis of the University of Queensland: Stepped-Frequency Radar Design and Signal Processing Enhances Ground Penetrating Radar Performance*. The University of Queensland, 1996., 180 p.
- [25] RAYMOND, Charles; NEUMAN, Thomas; RIGNOT, Eric; RIVERA, Andrés and CASASSA, Gino: *Retreat of Tyndall Galciers, Patagonia , Chile*, EOS Trasactions, American geophysical Union 2000, 81(48): F427, H61g-02.
- [26] RIVERA, Andrés; CASASSA, Gino; ACUÑA, Cesar (2001): *Mediciones de espesor en glaciares de Chile centro-sur* ; Invest Geogr., Chile 2001, 35:67-100.
- [27] SERIES OF THE CENTRO DE ESTUDIOS CIENTÍFICOS. *Proceeding of a meeting on the Patagonian icefiels, held March 24-28, 2000*, 192 p.

- [28] WOLLNY, K. (2002); *Umweltgipfels in Johannesburg*. Press. www.trinkwasser.ch , 5.10.2006.
- [29] ZAHN, Markus (1991): *Electromagnetic Field Theory*. McGRAW-HILL book Company, 746 p.

ANEXOS

Anexo A

Grupo de trabajo

1. Campaña Zona Central, glaciar Juncal Norte.

- Dr. Ing. Carlos Cárdenas Mansilla.
- MSc. Rubén Carvallo Barrientos.
- Ing. Geodesta, Heiner Lange

2. Campaña Norte Chico en el glaciar Jotabeche

- Dr. Ing. Carlos Cárdenas Mansilla
- MSc. Rubén Carvallo Barrientos
- Ing. Geodesta Heiner Lange
- Apoyo logístico Ercio Mettifogo Redic

3. Campaña Campo de Hielo Sur, glaciar Tyndall

- Dr. Ing. Carlos Cárdenas Mansilla
- MSc. Rubén Carvallo Barrientos
- Ing. Geodesta Jorge Hernández Inostroza
- Experto en seguridad de montaña, Luis Oyarzún Nancuante
- Experto en seguridad de montaña, Sergio Oyarzún Cárcamo
- Apoyo seguridad en montaña, Juan Fernández Becar (Ejército de Chile)
- Apoyo seguridad en montaña, Andrés Hernández (Ejército de Chile)
- Apoyo transporte, Carlos Pincheira (Ejército de Chile)
- Logística campamento, Luis Mercado
- Apoyo logístico Porteador
- Apoyo logístico Porteador

4. Trabajo de gabinete

- Dr. Ing. Carlos Cárdenas Mansilla
- MSc. Marco Antonio Peña Araya
- Profesor Alfredo Soto Ortega
- Audiovisualista Jorge Grez Leuquen
- Dr. Pedro Cid-Agüero
- Ing. Geodesta, Heiner Lange
- MSc. Rubén Carvallo Barrientos
- Ing. Geodesta, Jorge Hernández Inostroza

Anexo B

Recopilación de antecedentes y análisis de resultados previos

B.1. Análisis de trabajos y mediciones mediante RES en zona del glaciar Jotabeche

En general la literatura revisada muestra información referente a la geología de la zona del nevado Jotabeche en trabajos enfocados a explicar la evolución del Altiplano chileno. Por otra parte el glaciar Jotabeche es nombrado en ocasiones solamente como un tributario de la cuenca del glaciar Jorquera, sin embargo estudios orientados a la glaciología física del glaciar no fue posible de encontrar, por lo tanto la información que se obtendrá mediante los equipos de radio eco sonda je constituirá información inédita en este ámbito permitiendo establecer las bases de futuros trabajos a desarrollar en esta área.

El análisis preliminar de la topografía glaciar superficial será realizado mediante el uso de cartografía IGM, imágenes satelitales de la zona en conjunto con imágenes IKONOS de acceso libre en Internet.

B.2. Análisis de trabajos y mediciones mediante RES en la zona del glaciar Juncal Norte

En el análisis preliminar de este glaciar se contempla la revisión de la topografía superficial mediante el uso de cartografía IGM, imágenes satelitales e imágenes IKONOS de acceso libre en Internet. Por su fácil acceso y representatividad en el contexto del cambio que están experimentando los glaciares de la zona central de Chile y su relación con el clima este glaciar es interesante de estudiar para científicos de nuestro país y de diferentes partes del mundo. En la literatura se muestra principalmente una serie de estudios enfocados al análisis

de la cuenca del río Aconcagua haciendo uso de información obtenida a través de la base de datos recolectados por las estaciones hidro-climáticas pertenecientes a la dirección general de aguas [21], sin embargo existen pocos trabajos orientados a mediciones de las características físicas del glaciar. En referencia a estudios ya realizados en este sector utilizando la tecnología de radio eco sondaje se puede nombrar el trabajo desarrollado a través del laboratorio de glaciología implementado en cooperación entre la Universidad de Magallanes y la Universidad de Chile que permitió realizar mediciones sobre este glaciar. Dentro de este marco de cooperación se encuentra la información obtenida el año 2001 donde se estudió la zona de ablación, realizando un perfil longitudinal sobre la lengua del glaciar ubicada a una cota aproximada de 3000 m y obteniendo un espesor máximo en las mediciones de 230 metros [26]. Se contempla la realización de mediciones mediante el uso de radio eco sondaje sobre el mismo sector y será utilizado un sistema de radio eco sondaje de similares características.

B.3. Análisis de trabajos y mediciones mediante RES en zona del glaciar Tyndall

Al igual que en las otras zonas de estudio para el análisis preliminar del glaciar Tyndall se contempla la revisión de la topografía superficial mediante el uso de cartografía IGM, imágenes satelitales e imágenes IKONOS de acceso libre en Internet. El glaciar Tyndall es un glaciar representativo de la zona del Campo de Hielo Sur (CHS) debido a su gran tamaño y su similar comportamiento a otros grandes glaciares del campo de hielo, al igual que su cuenca que corresponde a una de las cuatro cuencas más significativas del Campo de Hielo Sur, siendo uno de los mayores aportes hídricos a la región de Magallanes. El glaciar Tyndall de acuerdo a la lista preliminar de glaciares patagónicos compilado por Liboutry en el año 1956 es el octavo glaciar más grande del campo de hielo patagónico.

Por su gran tamaño y representatividad en un contexto mayor, existe un gran interés científico al poder ser considerado como un glaciar de referencia para estudiar las variaciones climáticas a nivel global. En el año 1985 un grupo de científicos japoneses liderado por R. Naruse comenzó a estudiar las características de la superficie glaciar en la zona de ablación por medio de la instalación de balizas a lo largo de una transecta de 2,5 Km desde el margen derecho de este glaciar [23], luego en el año 1990 Casassa realiza por primera vez mediciones mediante el uso de un sistema de radio eco sondaje sobre la misma transecta, obteniendo información referente al espesor del hielo en esta zona, alcanzando una profundidad de hasta 600 metros en la zona central del glaciar Tyndall [8]. En el año 1993 la zona de ablación fue nuevamente medida por un equipo chileno-japonés con resultados similares pero obteniendo menores profundidades a las obtenidas anteriormente por Casassa [8]. En el año 1999 se realiza por primera vez mediciones sobre el glaciar Tyndall utilizando un sistema de radar aerotransportado perteneciente a un grupo de investigación del instituto de geociencias y recursos naturales de Hannover (BGR), Alemania. Las mediciones fueron realizadas con apoyo de un helicóptero, alcanzando espesores máximos de 800 m en la zona central y 462 m en su lengua principal, frente al lago pro-glaciar Geikie [7]. En los años 1999 y 2000 un equipo de la Universidad de Ohio, U.S.A. liderado por Ch. Raymond realiza mediciones utilizando otro sistema de radar, obteniendo nuevamente 600 m de espesor en la zona de ablación [25]. El

año 2001 la Umag, CECS, y el Instituto Niels Bohr de Dinamarca realiza vuelos de prueba utilizando un sistema de radar instalado sobre un avión del tipo Twin Otter, cuyos resultados no fueron muy satisfactorios [5]. El año 2003 la NASA con apoyo del CECS y la Armada de Chile realizaron vuelos de prueba sobre el glaciar con otro sistema de radar a bordo de un avión cuádrimotor, modelo Orión P3, perteneciente a la Armada de Chile, sin obtener grandes resultados. Entre los años 2003 al 2006 se realizan nuevas expediciones por parte de la Universidad de Magallanes en cooperación con el Centro de Estudios del Cuaternario (CEQUA) utilizando radio eco sonda superficial, esta vez se extienden las mediciones sobre una superficie mayor en la zona de ablación, obteniendo mediciones de hasta 700 metros de espesor [9]. Los años 2006 y 2007 se realizan mediciones de prueba utilizando un nuevo sistema de radar aerotransportado desarrollado por CECS, que se instaló en un avión caza del ejército de Chile, obteniendo mediciones aproximadas hasta los 600 metros en la zona central del glaciar (Comunicación personal). Finalmente en los últimos años 2007 y 2008 se realizan nuevas prospecciones mediante el uso de un sistema de radar aerotransportado perteneciente a la Universidad de Münster, Alemania en cooperación con la Universidad de Magallanes, el CECS y Armada de Chile y cuyos resultados preliminares muestran profundidades del glaciar entre los 200 a 700 m (Comunicación personal).

Anexo C

CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES E INGRESO A LAS ZONAS DE ESTUDIO

Luego de analizar la accesibilidad y logística de cada una de las zona de estudio se establecieron los periodos necesarios de terreno para desarrollar las actividades de acuerdo a las objetivos trazados. Las fechas para realizar las campañas de terreno fueron fijadas de acuerdo al siguiente calendario: Primera campaña al glaciar Juncal Norte, entre el 21 al 28 de Septiembre de 2008; Segunda campaña al glaciar Jotabeche entre el 29 de Septiembre al 06 de Octubre de 2008; y tercera campaña al glaciar Tyndall entre el 17 al 28 de Octubre de 2008.

C.1. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

C.1.1. Cronograma de actividades,Glaciar Jotabeche

- **27 Septiembre 2008:** Coordinación de la logística y el transporte. Retiro de la carga procedente desde Santiago por parte del nuevo integrante del equipo en Copiapó.
- **28 Septiembre 2008:** Viaje de los cuatro expedicionarios vía aérea desde Santiago a Copiapó. Reunión de coordinación con el quinto expedicionario quien trabajará como guía. Revisión de equipos en bodega Copiapó y compra de materiales como de la alimentación.
- **29 Septiembre 2008:** Traslado de los expedicionarios, equipos y carga en general vía terrestre hasta el campamento minero Caspiche, ubicado a 18 km del glaciar. Reunión de coordinación con personal de la minera para planificar el reconocimiento de la zona y buscar un sitio donde establecer el campamento base. Se pernocta en el campamento Caspiche.

- **30 Septiembre 2008:** Reconocimiento de la ruta de acceso al glaciar en conjunto con personal de la minera ETON, se logra acceder en vehículos doble tracción hasta los 5125 m.s.n.m. de altura. Instalación del campamento base dentro del mismo campamento Caspiche.
- **01 Octubre 2008:** Se intenta continuar accediendo en vehículo y a campo traviesa con el objetivo de acercarse aun más al glaciar Jotabeche. Solo es posible acercarse unos 100 m por lo tanto el acceso deberá ser realizado a pie desde ese punto. Se ubica un punto geodésico monumentado para la instalación de la estación fija GPS. Luego son preparados los equipos de medición y seguridad.
- **02 Octubre 2008:** Se accede en vehículo hasta el punto mas cercano al glaciar Jotabeche y se intenta ingresar a pie con el objetivo de realizar un reconocimiento de la zona. Este intento fue infructuoso por la gran cantidad de viento reinante en el área que no permitió el acceso. Se espera que las condiciones de viento disminuyan pero continuaron sin novedad durante todo el día.
- **03 Octubre 2008:** La disminución del viento es favorable, por lo tanto se accede nuevamente en vehículo hasta el punto más cercano al glaciar Jotabeche y se ingresa a pie cargando los equipos de medición. Se logra acceder al borde del glaciar en su parte baja, a una altura aproximada de 5200 m s.n.m. El glaciar en este sector tiene una pendiente que supera los 50° de inclinación por lo tanto se analiza la forma de realizar las mediciones y se opta por ascender hasta un lugar con un pendiente menor que se ubica en la zona alta del glaciar aproximadamente a los 5400 m.s.n.m. Con gran esfuerzo se accede a este lugar, procediendo luego a realizar las mediciones. Se logra realizar 3 mediciones puntuales. El gran esfuerzo físico desplegado en el asenso no permitió continuar con las mediciones.
- **04 Octubre 2008:** La condiciones de viento no hacen posible continuar con las mediciones. Desactivación del campamento, embalaje de los sistema de medición y equipos en general. Retorno vía terrestre a la ciudad de Copiapó. Parte de la carga es enviada vía terrestre a Santiago y la restante en una bodega en Copiapó. Retorno de un expedicionario vía terrestre a Santiago.
- **05 Octubre 2008:** Retorno de un segundo expedicionario vía terrestre a Santiago. Embalaje y envío de equipos de medición vía aérea desde Copiapó directo a Punta Arenas.
- **06 Octubre 2008:** Retorno de expedicionarios vía aérea desde Copiapó -Punta Arenas.
- **10 Octubre - 2008:** Retiro de carga en aeropuerto Punta Arenas.

C.1.2. Cronograma de actividades, Glaciar Juncal Norte

- **5 Septiembre 2008:** Viaje Punta Arenas Santiago. Planificación de campaña exploratoria en la zona del glaciar Juncal Norte.
- **6 Septiembre 2008:** Ingreso y reconocimiento de expedicionarios vía terrestre hasta la zona denominada Hornos de la Yesera, cajón del río Juncal, sector cercano al glaciar Juncal Norte.
- **7 Septiembre 2008:** Viaje de retorno Santiago - Punta Arenas.
- **15 -17 Septiembre 2008:** Preparativos de los equipos de medición, campamento y de seguridad en montaña para ser enviados posteriormente vía aérea desde Punta Arenas hacia Santiago.
- **18 Septiembre 2008:** Recepción de equipos en Santiago y traslado a bodega.
- **21 Septiembre 2008:** Viaje de dos de los expedicionarios vía aérea desde Punta Arenas-Santiago. Reunión de coordinación de los cuatro expedicionarios participantes en la campaña al glaciar Juncal Norte y revisión de equipos en bodega, Santiago.
- **22 Septiembre 2008:** Coordinación de la logística y el transporte a utilizar para el ingreso a la zona del Juncal Norte. Compra de alimentación y materiales para la expedición. Embalaje de los equipos en general.
- **23 Septiembre 2008:** Ingreso de los equipos vía terrestre hasta la zona desde donde se realizará el porteo vía aérea hasta el glaciar. Ingreso en helicóptero de los expedicionarios desde Santiago a la zona de trabajo e instalación del campamento base sobre el glaciar. Sobrevuelo sobre el glaciar juncal Norte.
- **24 Septiembre-2008:** Reconocimiento del sector de trabajo y preparación de los equipos de medición. Mediciones mediante el uso de un sistema de radar para prospección superficial. Instalación de un receptor GPS estático en las inmediaciones del campamento base e instalación de un GPS móvil. Se realiza la mitad de los perfiles transversales planificados. La información recopilada es revisada y a la vez respaldada.
- **25 Septiembre 2008:** Continuación de las mediciones mediante el uso de sistema de radar superficial, receptor GPS estático y GPS móvil. Se realiza la totalidad de la ruta planificada. Los registros son revisados y respaldados.
- **26 Septiembre 2008:** Desactivación del campamento. Embalaje de los sistema de medición y equipos en general. Recogida de los expedicionarios y carga en general desde el glaciar vía aérea hasta sector de acopio. La carga es trasladada vía terrestre y los expedicionarios vía aérea hasta Santiago. Acopio de la carga en bodega Santiago. Embalaje de equipos a utilizar en la campaña del glaciar Jotabeche y finalmente envío de la carga vía aérea desde Santiago a Copiapó.

C.1.3. Cronograma de actividades, Glaciar Tyndall

- **11-16 Octubre 2008:** Planificación, coordinación de la campaña al glaciar Tyndall. Reunión de nuevos expedicionarios y revisión de los equipos de medición, campamento y equipos de seguridad en montaña a utilizar en la campaña.
- **17 Octubre 2008:** Viaje de los expedicionarios vía terrestre y envío de carga en un vehículo de transporte desde Punta Arenas hasta administración del parque Nacional Torres del Paine. Se pernocta en la administración.
- **18 Octubre 2008:** Los exploradores ingresan a pie cargando equipaje personal hasta el sector denominado cañadón doña Rosa. Parte de la carga es transportada por caballos hasta el mismo sector. Se establece el campamento base.
- **19 Octubre 2008:** Se organiza el campamento base y se realiza una exploración preliminar de la ruta al glaciar Tyndall. Se preparan los equipos de medición.
- **20 Octubre 2008:** Se ubica un lugar en las cercanías del glaciar para acopio de equipos y son realizadas las primeras mediciones utilizando el sistema de radio eco sondaje, también se establece una estación GPS fija y otra móvil.
- **21 Octubre 2008:** Las condiciones climáticas son muy desfavorables, precipitación de nieve, imposibilitando trabajar en terreno, se analizan los datos obtenidos el día anterior.
- **22 Octubre 2008:** Nuevamente las condiciones climáticas son muy desfavorables, agua nieve, imposibilitando trabajar en terreno.
- **23 Octubre 2008:** Las condiciones climática mejoran permitiendo realizar mediciones de radar y GPS sobre el glaciar y se instalan 3 balizas en el sector.
- **24 Octubre 2008:** Las condiciones climáticas no son las mejores debido a la lluvia, sin embargo se sale a trabajar con el objetivo de poder terminar los trabajos en la zona de ablación para comenzar a planificar el acceso a la zona de equilibrio. Se establecieron dos grupos, el primero continuó trabajando en la zona de ablación instalando 2 balizas más y el segundo grupo realizó una exploración de la ruta hacia la zona de equilibrio. La lluvia no permitió continuar con las dos actividades debiéndose abortar las actividades.
- **25 Octubre 2008:** Las condiciones climáticas mejoraron pero continua inestable, se decide terminar el trabajo en la zona de ablación. Se realiza el acercamiento a los puntos para continuar midiendo, los problemas de humedad perjudicaron los equipos de medición, obligando nuevamente el aborto la operación.
- **26 Octubre 2008:** Se continúan realizando mediciones de radar y GPS sobre el glaciar. Se instalan las 3 balizas faltantes en el sector. Recolección de muestras de hielo y nieve en los puntos B08, B03 y B01 finalizando de esta manera las actividades sobre la zona de ablación.
- **27 Octubre 2008:** La condiciones climáticas continúan inestables y solo quedan dos días para el retorno decidiendo enfocar en actividades de apoyo a las mediciones realizadas, como por ejemplo el establecimiento de dos puntos en roca como referencia para

la calibración de un modelo digital de terreno y el porteo de accesorios para una futura campaña en la zona de equilibrio.

- **28 Octubre 2008:** Desactivación del campamento, embalaje de la carga en general. Los expedicionarios retornan a pie y la carga en general es retirada desde el campamento base hasta la guardería Grey utilizando nuevamente caballares para el transporte. Desde este lugar los expedicionarios retornan a Punta Arenas en un vehículo de pasajeros y la carga en general es trasladada vía terrestre por un vehículo de carga hasta la bodega en Punta Arenas.
- **29 Octubre 2008:** La carga es desconsolidada y retornada a su lugar de origen. Finalizan las campañas a terreno.

C.2. INGRESO A LAS ZONAS DE ESTUDIO

C.2.1. Ingreso a la zona del glaciar Jotabeche

Después de haber finalizado las actividades en el glaciar Juncal Norte se regresó a la ciudad de Santiago para comenzar a preparar la segunda expedición a la zona del glaciar Jotabeche ubicado en la tercera región (Atacama). Para desplazarnos hasta Copiapó fue necesario enviar la carga v'a aérea y coordinar la recepción en el lugar de destino con quien guiará luego hasta el glaciar Jotabeche. Una vez enviada la carga se trasladaron los expedicionarios hasta la ciudad de Copiapó donde se realizaron los últimos preparativos para la expedición.

El desplazamiento hacia la zona de estudio se realizó vía terrestre utilizando dos vehículos doble tracción a través de las rutas principales y secundarias hasta el campamento minero Caspiche, propiedad de la minera ETON ubicado a una altura aproximada de 3600 metros y aproximadamente a 18 Km del glaciar Jotabeche.

Una vez en el campamento Caspiche se conversó con personal de la minera, quienes tienen experiencia en la zona y conocen las rutas de acceso al glaciar, indicando algunas recomendaciones y posibilidades de acercarnos con vehículos a la zona del glaciar Jotabeche. Entre las recomendaciones discutidas estaba la posibilidad de establecer el campamento base dentro de las mismas instalaciones del campamento Caspiche, debido que a mayor altura en esa zona el viento aumenta considerablemente y no existen muchas alternativas de resguardo, sin embargo el interés por parte de los expedicionarios es permanecer lo mas cerca posible de la zona de estudio por un tema de adaptación y rapidez en la accesibilidad al glaciar. Se optó por pernoctar la primera noche en el campamento y salir muy temprano al otro día en búsqueda de un lugar mas cercano al glaciar que presente buenas condiciones para establecer un campamento base pensando en un lugar aproximadamente a los 4000 metros de altura. Una vez efectuado el reconocimiento preliminar de terreno gracias a la ayuda de funcionarios de la minera, quienes colaboraron indicando la ruta de acceso al glaciar, se determinó que las condiciones para establecer un campamento base, se presentaban hasta aproximadamente los



Figura C.1: Acceso desde el campamento Caspiche hacia el glaciar Jotabeche.

3800 metros que es comparable a los 3600 metros de la ubicación del campamento Caspiche, estableciendo que a mayor altura las condiciones variaban considerablemente presentando inconvenientes como falta de agua, y principalmente desprotección del viento, decidiendo por lo tanto, establecer el centro de operaciones dentro de las mismas instalaciones del campamento.

Una vez establecido el campamento base y la ruta de acceso gracias a la colaboración de los funcionarios de la minera, se intenta una aproximación hasta el glaciar Jotabeche. En una primera etapa se realizó la aproximación desde el campamento base Caspiche vía vehículos de doble tracción, internándose a través de los caminos construidos por las mineras y en ocasiones a campo traviesa debido a la presencia de nieve que los obstruía. Esto permitió acercarse al glaciar hasta aproximadamente 1,8 Km de distancia, a una altura aproximada de 5125 metros (fotografía C.2), luego una fuerte pendiente no permite continuar hacia el glaciar utilizando vehículos, por lo tanto se deberá continuar a pie, sin embargo el viento presente de aproximadamente 100 Km/h en la zona impidió el acceso, por lo que se debió esperar un día para un nuevo intento.



Figura C.2: Acceso a las cercanías del glaciar Jotabeche a una altura aproximada de 5125 metros, por medio de vehículos doble tracción.

C.2.2. Ingreso a la zona del glaciar Juncal Norte

Exploración preliminar

Con el objetivo de evaluar en terreno las condiciones reales de ingreso a la lengua del glaciar Juncal Norte se programó una excursión preliminar al sector denominado los Hornos de la Yesera. Esta excursión fue realizada entre los días 5 y 6 de Septiembre del presente año, cuyo traslado se realizó mediante un vehículo doble tracción, partiendo desde la ciudad de Santiago a través de la ruta 57 CH, para luego proseguir por la ruta internacional 60 CH en dirección al paso fronterizo los Libertadores, posteriormente se accedió en dirección sur por un camino secundario que se interna hacia el cajón del río Juncal. Este camino lleva hasta nuestro objetivo, si se desea proseguir hasta el glaciar se deberá continuar a pie hasta su lengua. La distancia desde el cruce de la ruta internacional 60 CH hasta el sector de los Hornos de la Yesera es de aproximadamente 8 km. Este recorrido normalmente puede ser realizado con vehículos de tracción simple, sin embargo la cantidad de nieve caída o en ocasiones el cruce de un río y por causa de los deshielos se hace necesario la utilización de vehículos doble tracción, en esta ocasión se utilizó uno de estos, pero debido a la presencia de rodados de nieve (avalanchas) en algunos sectores del camino que obstruían el paso, se debió proseguir a pie por un periodo de tres horas, salvando varios rodados para acceder finalmente hasta el sector de los Hornos de la Yesera, ubicado a una altitud aproximada de 2540 metros, desde donde es posible admirar a la distancia el Nevado Juncal y el imponente Alto los Leones, figura C.5. Luego de esta excursión se decidió que se debía acceder a la zona de estudio vía aérea, por la incapacidad del ingreso de vehículos y por razones de seguridad con respecto a los rodados que son muy comunes en la zona, especialmente en este periodo del año.

El acceso a la zona de ablación del glaciar Juncal Norte se realizó vía aérea utilizando los servicios de la compañía Andes Helicópteros con oficina en la ciudad de Santiago. El



Figura C.3: Camino interior hacia el glaciar Juncal Norte obstruido por un rodado



Figura C.4: Acceso a la lengua del glaciar Juncal Norte a través del cajón del Río Juncal



Figura C.5: Vista panorámica del Nevado Juncal y a su derecha el Alto los Leones



Figura C.6: Ubicación general del lugar de posada del helicóptero, desde donde se transportó al personal y se procedió al porteo de la carga en general ($32^{\circ}52' S$, $70^{\circ}09' O$)

helicóptero utilizado fue un AS 350 Ecuriel de la línea Eurocopter, con capacidad para 5 pasajeros y un máximo de carga de 2.250 Kg como peso de despegue.

El operativo de entrada al glaciar se realizó el día martes 23 de Septiembre del 2008 con el transporte de carga vía terrestre desde la ciudad de Santiago hasta la intersección de la ruta internacional 60 CH con el camino secundario que se interna hacia el cajón del río Juncal. Luego se procedió a realizar el porteo de la carga en general y de los cuatro integrantes de la campaña con sus respectivos equipos personales. Ellos correspondían a dos encargados de los equipos de radio eco sondaje, un geodesta y un encargado de logística y seguridad en montaña. El helicóptero despegó desde un helipuerto particular ubicado en el sector de las Huaitatas en Santiago para posteriormente cruzar la cordillera de los Andes y luego descender y aterrizar junto a la carga transportada vía terrestre, ocupando un tiempo aproximado de vuelo de Santiago de 20 minutos. El sector de aterrizaje del helicóptero fue en la entrada del cajón del río Juncal ($32^{\circ}52' S$, $70^{\circ}09' O$), desde ese punto se realizaron cuatro vuelos, permitiendo transportar a los expedicionarios y la carga en general con un peso aproximado de 200 Kg correspondientes a equipos de medición y campamento en general. La operación de traslado a la zona de estudio ubicada en el sector de ablación del glaciar Juncal Norte se realizó en aproximadamente dos horas. Posteriormente se estableció el campamento base a una altura aproximada de 3300 m, con coordenadas $32^{\circ}59' S$, $70^{\circ}05' O$, desde donde se realizaron las operaciones de medición (fig C.8).

C.2.3. Ingreso a la zona del glaciar Tyndall

El ingreso a la zona del glaciar Tyndall se realizó vía terrestre desde la ciudad de Punta Arenas en dirección a Puerto Natales para proseguir hasta el sector de guardería Grey, ubicado en el interior del Parque Nacional Torres del Paine. La carga en general fue transportada por un vehículo, hasta este lugar, sin embargo para proseguir el camino hacia glaciar Tyndall fue necesario transportar esta misma carga desde la guardería Grey utilizando 22 caballos, que



Figura C.7: Helicóptero posado en lugar donde se instaló el campamento base sobre la lengua terminal del glaciar Juncal Norte



Figura C.8: Campamento base sobre el glaciar Juncal Norte a una altura aproximada de 3300 metros , (32°59' S, 70°05' O)

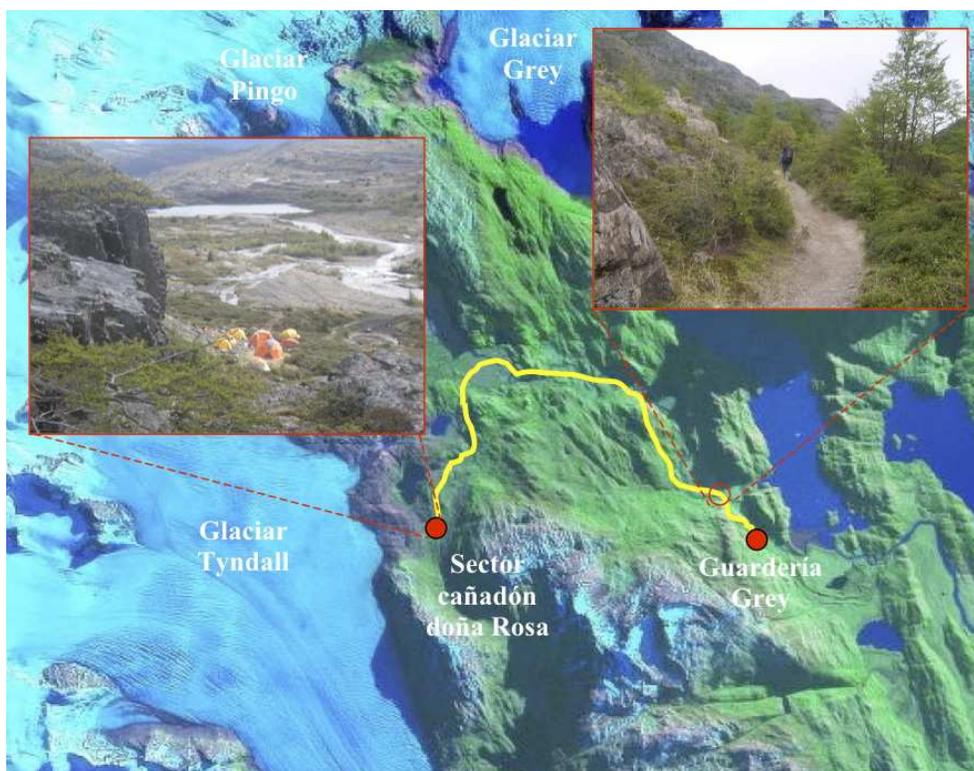


Figura C.9: Trayecto recorrido entre la guardería Grey, Parque Nacional Torres del Paine y el sector denominado cañadón doña Rosa donde se instaló el campamento base.

para realizar el transporte fue necesario cargar en bultos de a tres, debido a su capacidad de transporte de hasta 60 Kg. Los caballos transportaron la totalidad de la carga que consistía de equipos científicos como los de campamento y materiales en general. Esta ruta es realizada por los caballos a través de un sendero marcado, el cual es utilizado normalmente por turistas para acceder al sector denominado mirador Zapata, sector cuya vista panorámica permite ver hacia el noreste el glaciar Pingo, hacia el norte el cerro Zapata y la caída de parte de uno de los lóbulos del glaciar Tyndall. El acceso hasta este sector es realizado a pie en aproximadamente en 4 horas y media para luego una vez alcanzando este punto continuar por 1 hora y media más, para alcanzar el sector denominado cañadón doña Rosa donde se instaló el campamento base. En total el acceso a pie hasta este lugar tiene una duración de 6 horas y el mismo recorrido efectuado por los caballos con carga es de aproximadamente 4 horas.

Una vez transportada la carga por los caballos hasta el sector del cañadón doña Rosa, se estableció el campamento base ubicado aproximadamente en las coordenadas geográficas $51^{\circ} 07'$ latitud Sur y $73^{\circ} 16'$ longitud Oeste, a los pies de un paredón que resguarda en forma natural ante el viento de esa zona. Por otra parte como el grupo de expedicionarios estaba compuesto por 10 personas, se debieron instalar 6 carpas dormitorio, una carpa cocina y una carpa para ser utilizada como comedor-oficina como puede ser apreciado en la figura C.10.

La primera actividad después de instalar el campamento fue realizar un reconocimiento de la ruta de acceso al glaciar Tyndall. Desde el campamento base se debe realizar una



Figura C.10: Acceso al glaciar Tyndall desde el campamento base instalado en el cañadon doña Rosa.

pequeña escalada para salvar el paredón, luego se debe proseguir a pie sobre el manto rocoso a lo largo del camino, cruzando un río y subiendo paulatinamente hasta el mismo glaciar ocupando un tiempo estimado de 35 minutos para realizar este recorrido.

Por las malas condiciones climáticas se debieron posponer los trabajos sobre el glaciar algún tiempo, disminuyendo las posibilidades de desplazarnos vía terrestre hasta la zona de equilibrio del glaciar aproximadamente a los 900 m.s.n.m. por el tiempo que se deberá utilizar en el desplazamiento hasta ese sector, como consecuencia de no contar con el apoyo aéreo. Sin embargo a pesar de las malas condiciones climáticas se realizó el porteo de los equipos de medición junto a algunos accesorios que serán utilizados hasta un lugar de acopio cercano a la zona de ablación del glaciar. La ruta hasta la zona de ablación es fácil de identificar debido que ella se encuentra señalada mediante pircas a lo largo del camino.

Anexo D

PERFILES DE RADAR

D.1. Perfiles de radar obtenidos en el glaciar Tyndall

En este anexo se entregan los perfiles de radar obtenidos en forma discreta¹ sobre la transecta proyectada en la zona de ablación del glaciar Tyndall (Balizas B1 a B8, ver figura. E.3).

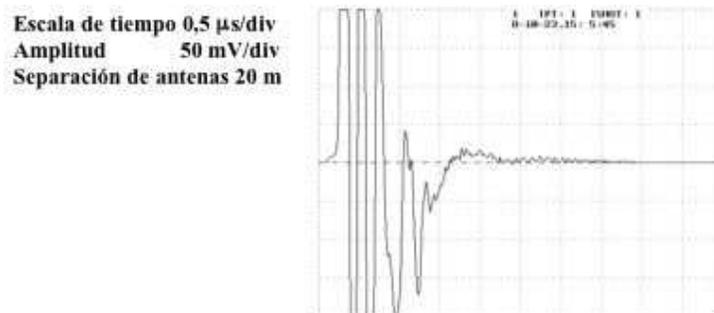


Figura D.1: Traza en formato tipo A obtenida en la baliza B01.

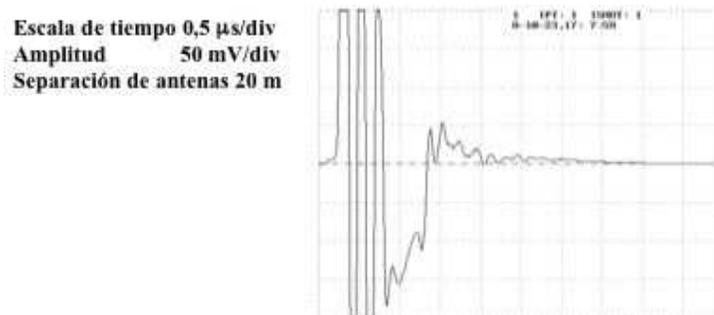


Figura D.2: Traza en formato tipo A obtenida entre las balizas B01 y B02.

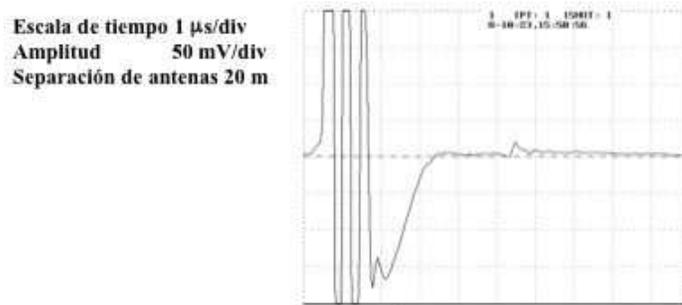


Figura D.3: Traza en formato tipo A obtenida en la baliza B02.

¹Medición realizada con el sistema de radar en forma puntual, por esta razón se genera solamente un perfil por cada punto.

Escala de tiempo 0,5 μ s/div
Amplitud 50 mV/div
Separación de antenas 20 m

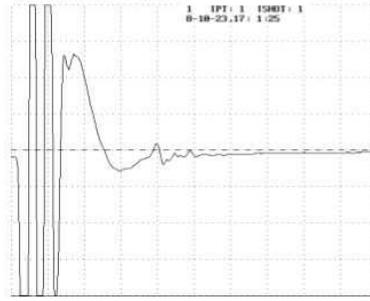


Figura D.4: Traza en formato tipo A obtenida entre las balizas B02 y B03.

Escala de tiempo 0,5 μ s/div
Amplitud 50 mV/div
Separación de antenas 20 m

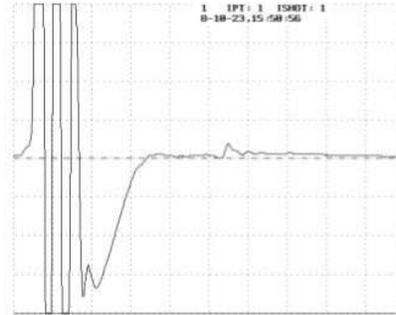


Figura D.5: Traza en formato tipo A obtenida en la baliza B03.

Escala de tiempo 0,5 μ s/div
Amplitud 50 mV/div
Separación de antenas 20 m

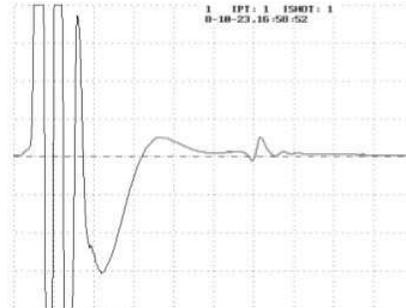


Figura D.6: Traza en formato tipo A obtenida entre las balizas B03 y B04.

Escala de tiempo 0,5 μ s/div
Amplitud 50 mV/div
Separación de antenas 20 m

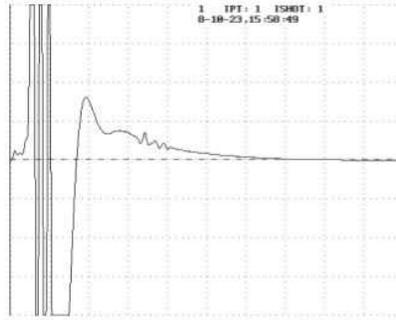


Figura D.7: Traza en formato tipo A obtenida en la balizas B04.

Escala de tiempo 1 μ s/div
Amplitud 50 mV/div
Separación de antenas 20 m

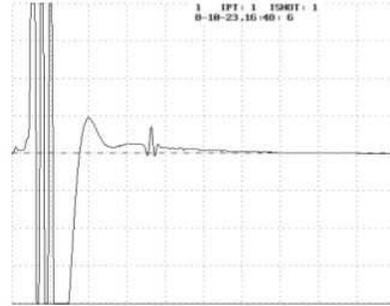


Figura D.8: Traza en formato tipo A obtenida entre las balizas B04 y B05.

Escala de tiempo 0,5 μ s/div
Amplitud 50 mV/div
Separación de antenas 20 m

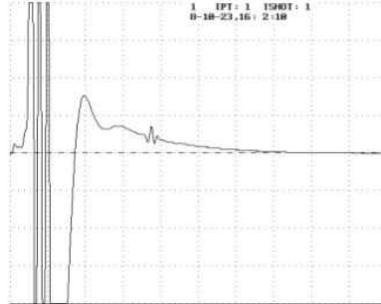


Figura D.9: Traza en formato tipo A obtenida en la baliza B05.

Escala de tiempo 0,5 μ s/div
Amplitud 50 mV/div
Separación de antenas 20 m

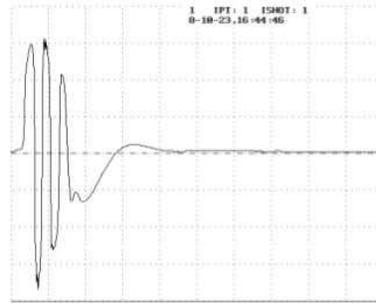


Figura D.10: Traza en formato tipo A obtenida entre las balizas B05 y B06.

Escala de tiempo 0,5 μ s/div
Amplitud 50 mV/div
Separación de antenas 20 m

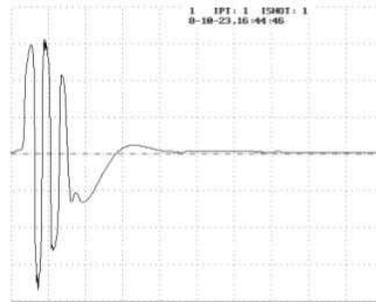


Figura D.11: Traza en formato tipo A obtenida en la baliza B06.

Escala de tiempo 0,5 μ s/div
Amplitud 50 mV/div
Separación de antenas 20 m

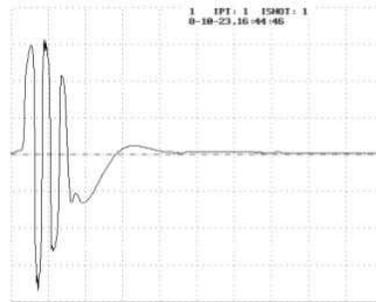


Figura D.12: Traza en formato tipo A obtenida entre las balizas B06 y B07.

D.2. Perfiles de radar obtenidos en el glaciar Jotabeche

En este anexo se entregan los dos únicos perfiles de radar obtenidos en forma discreta² sobre la zona central del glaciar Jotabeche.

Escala de tiempo 0,2 μ s/div
Amplitud 20 mV/div
Separación de antenas 10 m
Número de disparos 2

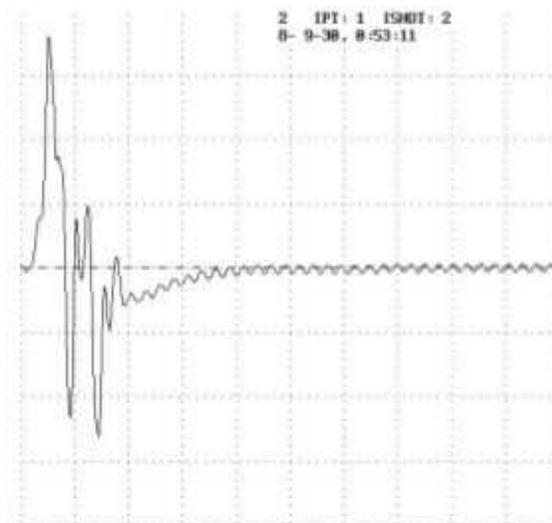


Figura D.13: Traza en formato tipo A obtenida en la zona central del glaciar Jotabeche a 5400 m.s.n.m. (Punto JOTA3)

Escala de tiempo 0,2 μ s/div
Amplitud 20 mV/div
Separación de antenas 10 m
Número de disparos 2

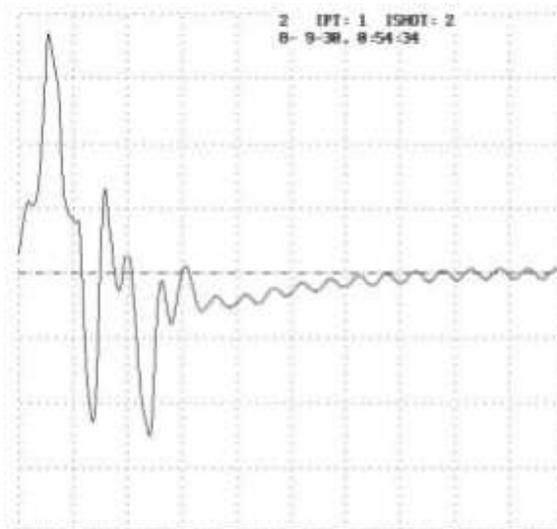


Figura D.14: Traza en formato tipo A obtenida en la zona central del glaciar Jotabeche a 5400 m.s.n.m.(Punto JOTA4).

²Medición realizada con el sistema de radar en forma puntual, por esta razón se genera solamente un perfil por cada punto

D.3. Radargrama obtenido en la zona del glaciar Juncal Norte

En este anexo se entregan los radargramas³ de radar obtenidos en forma continua⁴ sobre los recorridos proyectados en la zona de ablación del glaciar Juncal Norte (ver figura. D.15).

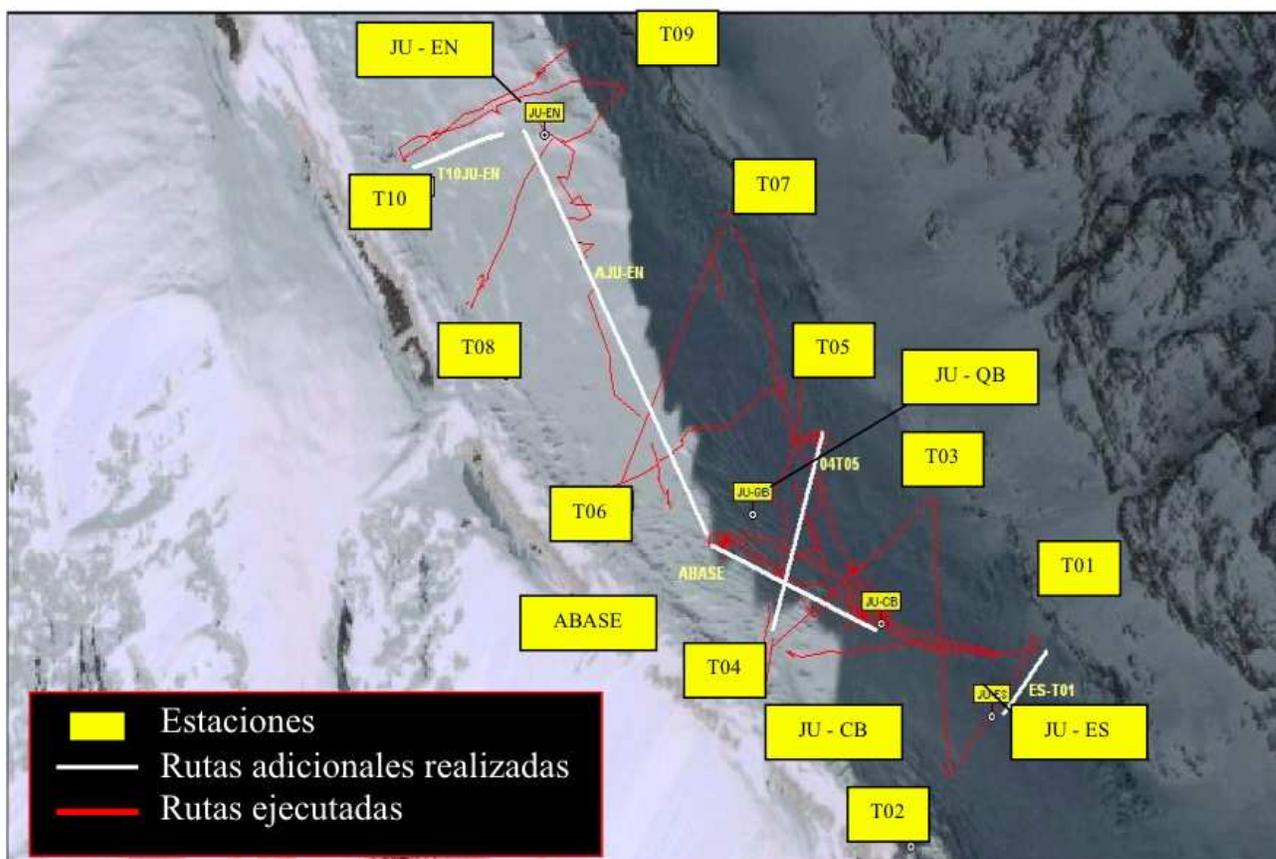


Figura D.15: Recorridos realizados sobre la zona del glaciar Juncal Norte.

³Conjunto de perfiles de radar presentados en un diagrama continuo.

⁴Medición realizada con el sistema de radar en forma continua.

Archivos	Trayecto Inicio - Término	Número de trazas	Distancia Recorrida (m)
J0		291	Prueba
T01T02	T01-T02	68	250
T1AT02	T01-T02	58	Prueba
1AT02B		166	Prueba
T02BT03A	T02-T03	226	416 (Prueba)
T03T04	T03-T04	80	380
T04T05	T04-T05	263	420
T05T06	T05-T06	640	383
T06T07	T06-T07	388	471
T07T08	T07-T08	411	477
T08T09	T08-T09	455	424
T09T10	T09-T10	426	404
T10JU-EN	T10-JU-EN	2141	253
AJU-EN	JU-EN - ABASE	2167	676
ABASE	ABASE-JU-CB	1049	335
ES-T01	T01- JU-ES	97	150
T01T04	T01-T04	278	492
04T05	T04-T05	397	423
TOTAL RECORRIDO			5954 (m)

Cuadro D.1: Transectas planificadas y rutas ejecutadas en terreno.

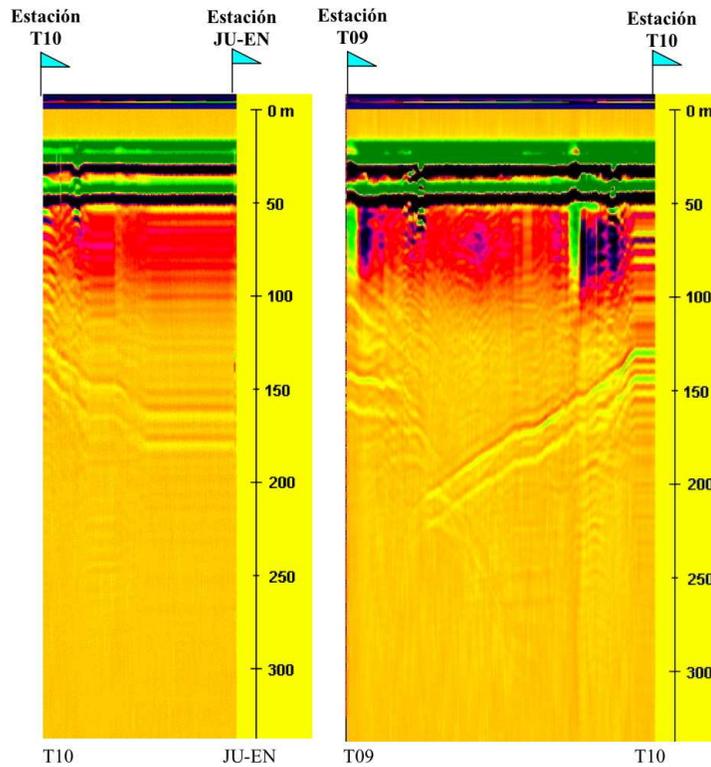


Figura D.16: Radargrama entre la estación T10 hasta JU-EN y la estación T9 hasta T10.

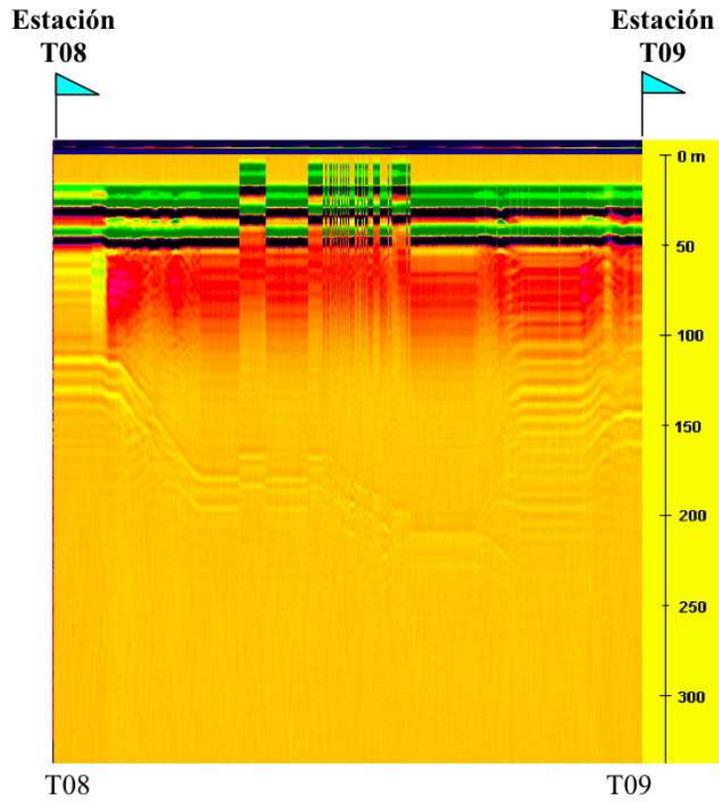


Figura D.17: Radargrama entre la estación T8 hasta la estación T9.

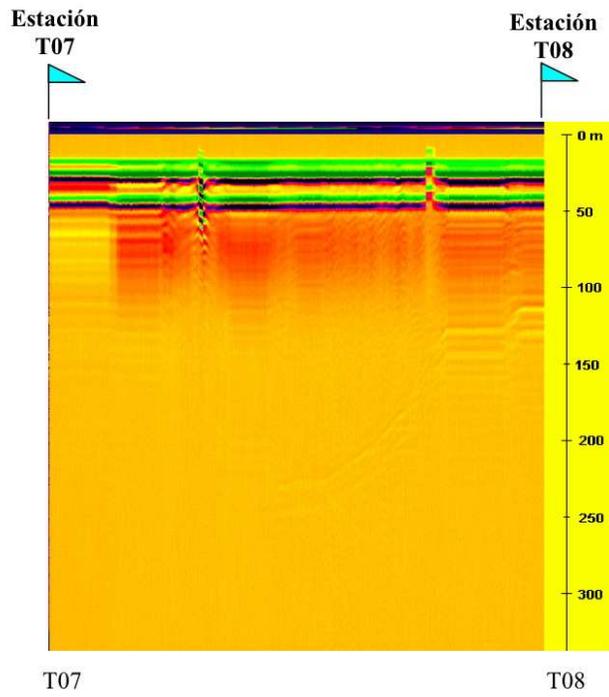


Figura D.18: Radargrama entre la estación T7 hasta la estación T8.

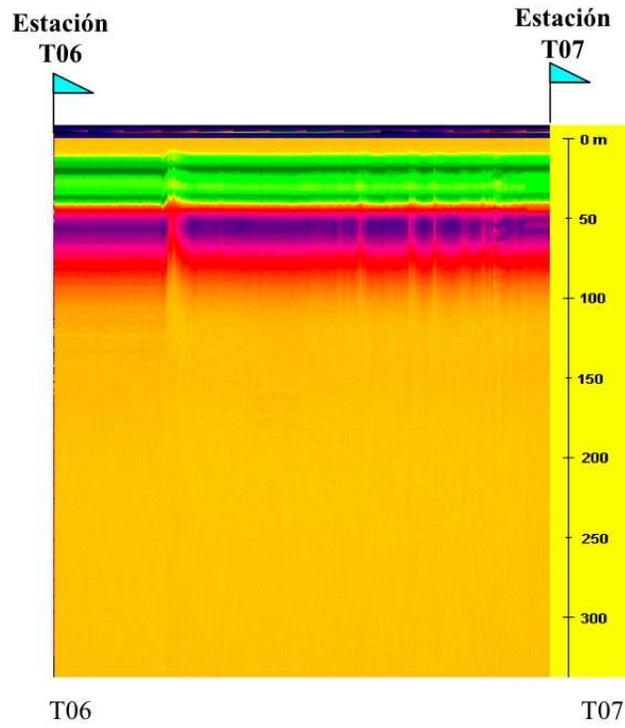


Figura D.19: Radargrama entre la estación T6 hasta la estación T7.

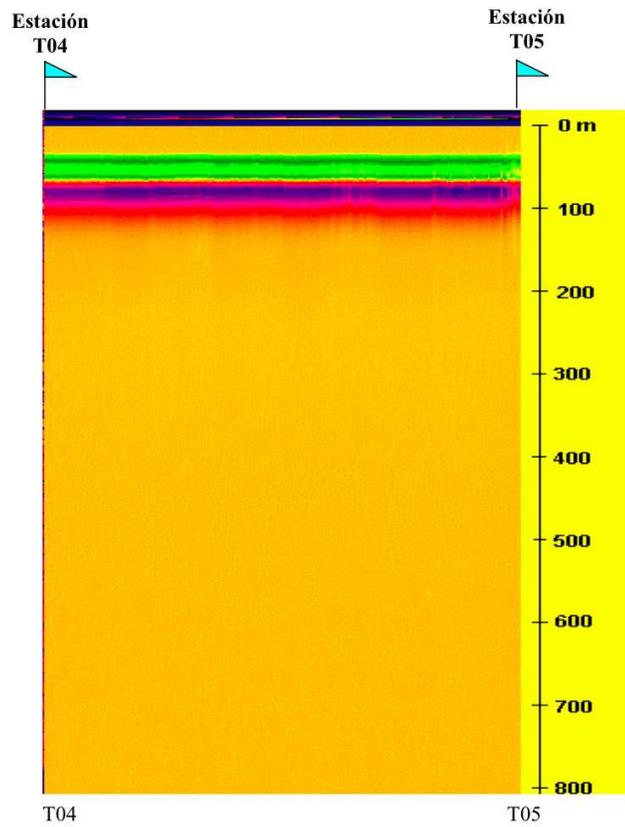


Figura D.20: Radargrama entre la estación T4 hasta la estación T5.

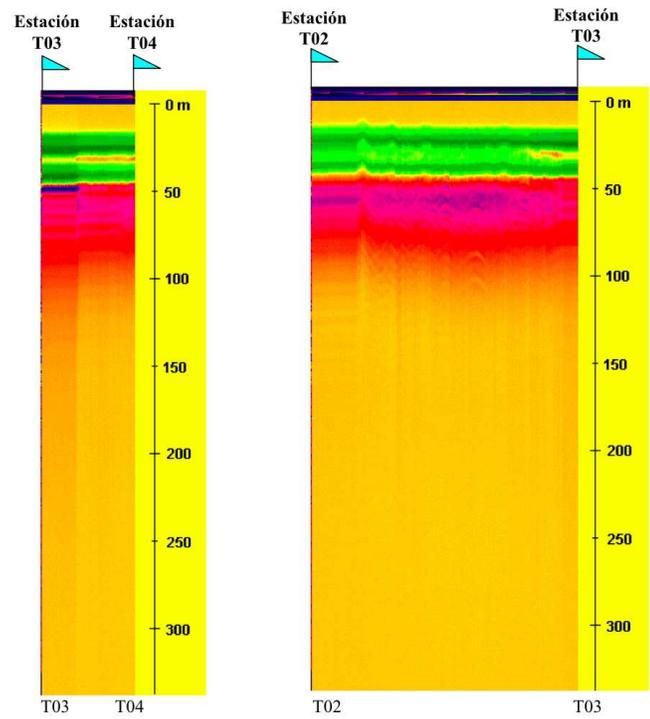


Figura D.21: Radargrama entre la estación T3 hasta T4 y la estación T2 hasta T3.

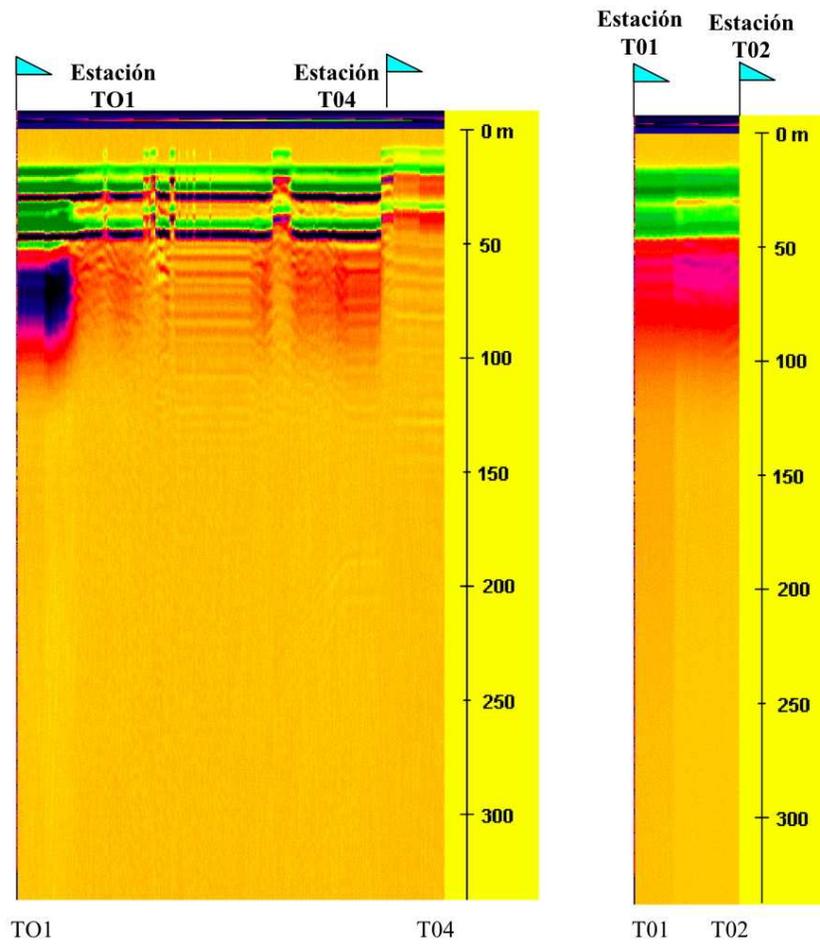


Figura D.22: Radargrama entre la estación T01 hasta T04 y la estación T01 hasta T02.

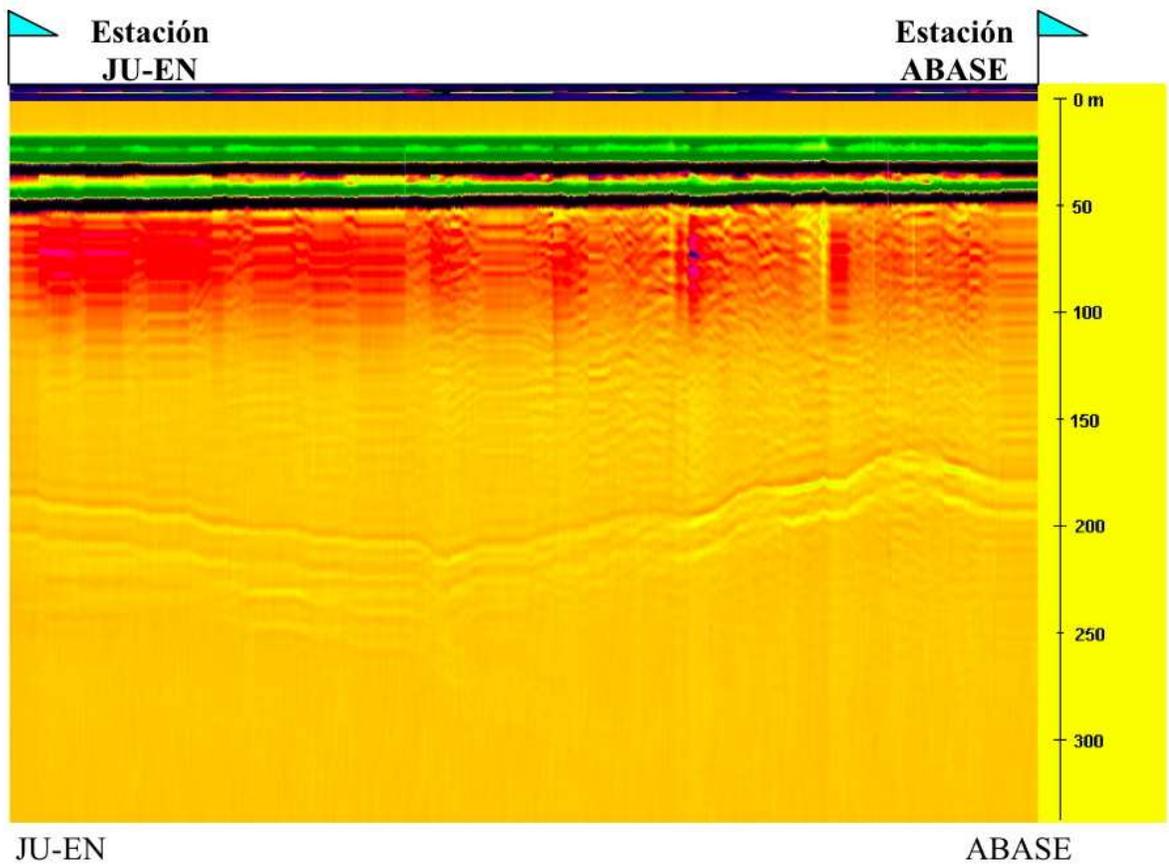


Figura D.23: Radargrama entre la estación JU-EN a la estación ABASE.

Anexo E

RUTAS GEORREFERENCIADAS

En este anexo se muestran las rutas de aproximación realizadas a cada una de las zonas de estudio, las cuales fueron georreferenciadas mediante el uso de sistemas GPS's topográficos.

- **Glaciar Jotabeche**
- **Glaciar Juncal Norte**
- **Glaciar Tyndall**

E.1. Glaciar Jotabeche



Figura E.1: Ruta georreferenciada, realizada desde el campamento Caspiche, propiedad de la compañía minera ETON, hacia el glaciar Jotabeche.

E.2. Glaciar Juncal Norte



(a) Ruta aérea georreferenciada realizada desde el helipuerto de las Huaitatas, ciudad de Santiago hasta la zona del glaciar Juncal Norte.



(b) Ruta aérea específica de la zona del glaciar Juncal Norte.

Figura E.2: Ruta aérea georreferenciada hacia la zona del glaciar Juncal Norte.

E.3. Glaciar Tyndall

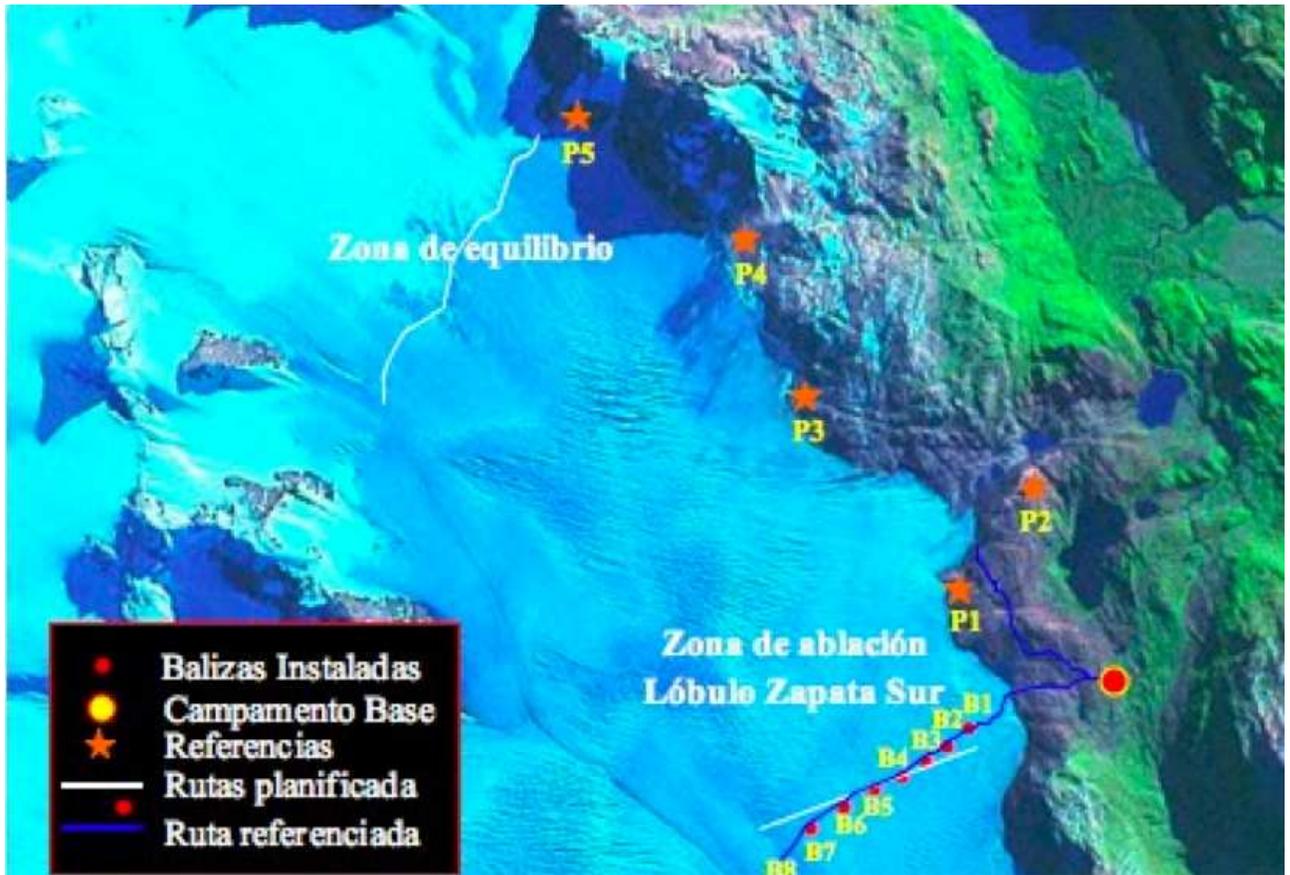


Figura E.3: Trayecto georreferenciado de la zona de ablación del glaciar Tyndall.

Anexo F

REPRESENTACIÓN CARTOGRÁFICA

Este anexo contiene la cartografía generada por el proyecto cuyo formato en papel se adjunta al informe en su correspondiente escala.

- Cartografía del glaciar Jotabeche
- Cartografía del glaciar Juncal Norte
- Cartografía del glaciar Tyndall

Anexo G

REPRESENTACIÓN TRIDIMENCIONAL (DEM)

Este anexo contiene los modelos digitales de elevación cuyo formato en papel se adjunta al informe en su correspondiente escala.

- Modelo digital de elevación del glaciar Jotabeche
- Modelo digital de elevación del glaciar Juncal Norte
- Modelo digital de elevación del glaciar Tyndall

Anexo H

MATERIAL AUDIOVISUAL

(Se adjunta copia del video PILARES DEL AGUA)