



**REPÚBLICA DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS**

ESTRATEGIA NACIONAL DE GLACIARES

ESTUDIOS ANEXOS

REALIZADO POR:

CENTRO DE ESTUDIOS CIENTÍFICOS - CECS

S.I.T. N° 205

Santiago, Diciembre 2009

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

Ministro de Obras Públicas
Ingeniero Civil Industrial Sr. Sergio Bitar Ch.

Director General de Aguas
Abogado Sr. Rodrigo Weisner L.

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

Inspectores Fiscales
Ingeniero Civil Sr. Fernando Escobar C.
Ingeniero Civil Sr. Cristóbal Cox O.

CENTRO DE ESTUDIOS CIENTÍFICOS

Jefe de Proyecto
Dr. Andrés Rivera (Glaciólogo)

Profesionales
MSc Francisca Bown (Glacióloga)
Claudio Bravo (Geógrafo)
Daniela Carrión (Licenciada en Geografía)
Dr. Gino Casassa (Glaciólogo)
Claudia Flores (Secretaria)
Dra. Paulina López (Hidroglacióloga)
MSc Camilo Rada (Geofísico)
Sebastián Vivero (Licenciado en Geografía)
Pablo Zenteno (Geógrafo)

Índice

1. ANEXO: MODELAMIENTO HIDROLÓGICO EN CUENCAS GLACIARES.....	7
1.1. Definición de modelamiento hidrológico.....	7
1.2. Tipos de modelos hidrológicos	7
1.2.1. Modelos distribuidos y globales	7
1.2.2. Modelos estocásticos y deterministas	8
1.2.3. Modelos dinámicos y estáticos	8
1.2.4. Modelos continuos y discontinuos	8
1.2.5. Modelos mecánicos, conceptuales y empíricos	8
1.3. Modelamiento hidrológico en cuencas no glaciares.....	9
1.3.1. El modelo Génie Rural à 2 paramètres Mensuel (GR2M) (Makhlouf, 1994); (Perrin <i>et al.</i> , 2007)	9
1.3.2. El modelo Hydrologic Routing Algorithm (HYDRA) (Coe, 2000)	9
1.4. Modelamiento hidrológico en cuencas glaciares	10
1.4.1. Modelamiento hidrológico en la cuenca del Río Santa, Cordillera Blanca, Perú (Suárez, 2007; Suárez <i>et al.</i> , 2008).....	11
1.4.2. Modelamiento hidrológico en diversas cuencas de la Cordillera Blanca, Perú (Pouyaud <i>et al.</i> , 2005).....	13
1.4.3. Modelamiento de escurrimiento observado y futuro en la cuenca de Llanganuco Cordillera Blanca, Perú (Juen <i>et al.</i> , 2007)	15
1.4.4. Modelamiento hidro-glaciológico en el valle Zinal, Valais, Suiza (Huss <i>et al.</i> , 2008) 16	
1.4.5. Respuesta de Hofsjökull y Vatnajökull Sur (Islandia) frente a cambios climáticos en los próximos 2 siglos (Aðalgeirsdóttir <i>et al.</i> , 2006)	19
1.4.6. Modelo de escurrimiento de la cuenca alpina glaciar Salzach (Austria): validación de resultados multidisciplinarios (Koboltschnig <i>et al.</i> , 2008)	20
1.4.7. Simulación del flujo del hielo y escorrentía de los glaciares de la cuenca del Río Yili, cadena Tien Shan, China noroccidental (Ye <i>et al.</i> , 2003)	21
1.5. Discusión y conclusión	22
2. ANEXO: MODELAMIENTO HIDRO-GLACIOLÓGICO DE CUENCAS SELECCIONADAS.....	26
2.1. Descripción general del modelo aplicado	26
2.2. Modelamiento en la cuenca del glaciar Echaurren.....	28
2.2.1. Datos disponibles.....	29
2.2.1.1. Sistema de Información Geográfica (SIG)	29
2.2.1.2. Datos hidro-meteorológicos	31
2.2.2. Aspectos generales para la aplicación del modelo a la cuenca Echaurren	32
2.2.2.1. Gradiente de temperatura	32
2.2.2.2. Gradiente de precipitación	32
2.2.3. Procesamiento de la zona glaciar.....	34
2.2.3.1. Posición de la línea de equilibrio del glaciar	34
2.2.3.2. Variación del volumen de hielo y de la superficie glaciar	35
2.2.3.3. Derretimiento potencial de nieve y hielo	36
2.2.3.3.1. Coeficientes grado-día para la nieve y el hielo	36
2.2.3.4. Reservorio nieve	37
2.2.3.5. Reservorio Hielo.....	38
2.2.4. Procesamiento de la zona no glaciar.....	39
2.2.4.1. Caudal Base.....	39

2.2.4.2.	Reservorio Rápido.....	40
2.2.5.	Resultados	40
2.2.5.1.	Simulación de caudal para el período 1977 - 2000	40
2.2.5.2.	Proyección del caudal de acuerdo a escenarios futuros de cambio climático..	42
2.3.	Modelamiento hidro- glaciológico de la cuenca del Glaciar Nef.....	46
2.3.1.	Localización y descripción del glaciar Nef	46
2.3.2.	Aspectos generales para la aplicación del modelo a la cuenca del río Nef	46
2.3.2.1.	Sistema de Información Geográfica (SIG)	46
2.3.2.2.	Datos hidro-meteorológicos disponibles para la cuenca del río Nef.....	49
2.3.2.2.1.	Caudal	49
2.3.2.2.2.	Nivel de agua y descarga en la estación hidrológica del río Nef	50
2.3.2.2.3.	Datos meteorológicos (precipitación y temperatura).....	51
2.3.3.	Resultados	51
2.3.3.1.	Simulación de caudal para el período 1977 - 2001	51
2.3.3.2.	Proyección del caudal de acuerdo a escenarios futuros de cambio climático..	56
2.4.	Modelamiento hidro-glaciológico de la cuenca del río Pulido, Copiapó.....	60
2.4.1.	Localización y descripción de la cuenca.....	60
2.4.2.	Resultados	62
2.4.2.1.	Simulación de caudal para el período 1993 - 2008	62
2.4.2.2.	Proyección del caudal de acuerdo a escenarios futuros de cambio climático..	63
2.5.	Conclusiones y recomendaciones	66
3.	ANEXO: MONITOREO DE GLACIARES PILOTO	69
3.1.	Elección de glaciares piloto: Glaciares Universidad y Mocho (Figura 3.1)	69
3.1.1.	Glaciar Universidad, valle del río Tinguiririca, Región de O'Higgins	70
3.1.2.	Reforzamiento de programa existente de monitoreo: Glaciar del Mocho, Volcán Mocho Choshuenco, Región de los Ríos.....	72
3.2.	Enfoque metodológico a ser aplicado en la implementación del glaciar piloto....	74
3.3.	Instrumentación	76
3.3.1.	Glaciar Universidad.....	76
3.3.2.	Glaciar Mocho	78
3.4.	Informes de actividades en terreno en glaciar Universidad	79
3.4.1.	Terreno 1: Octubre 2008.....	79
3.4.1.1.	Introducción.....	79
3.4.1.2.	Objetivo general	79
3.4.1.3.	Objetivos Científicos.....	79
3.4.1.4.	Participantes en esta campaña de terreno	79
3.4.1.5.	Duración	80
3.4.1.6.	Materiales utilizados.....	80
3.4.1.7.	Logística	80
3.4.1.8.	Resultados de las actividades realizadas	80
3.4.1.9.	Dificultades técnicas.....	80
3.4.1.10.	Conclusiones.....	82
3.4.2.	Terreno 2: Enero 2009.....	83
3.4.2.1.	Introducción.....	83
3.4.2.2.	Objetivo general	84
3.4.2.3.	Objetivos científicos	84
3.4.2.4.	Integrantes CECS participantes en la campaña a terreno.....	84
3.4.2.5.	Duración	84
3.4.2.6.	Materiales utilizados.....	84
3.4.2.7.	Logística	85
3.4.2.8.	Resultados de las actividades realizadas	85
3.4.2.9.	Dificultades técnicas.....	86
3.4.2.10.	Conclusiones.....	86
3.4.2.11.	Descripción de actividades por día	89

3.4.2.11.1.	1 ^{er} día: 17/01/2009.....	89
3.4.2.11.2.	2 ^{do} día: 18/01/2009.....	89
3.4.2.11.3.	3 ^{er} día: 19/01/2009.....	90
3.4.2.11.4.	4 ^{to} día: 20/01/2009.....	90
3.4.2.11.5.	5 ^{to} día: 21/01/2009.....	90
3.4.2.11.6.	6 ^{to} día: 22/01/2009.....	90
3.4.3.	Terreno 3: Marzo 2009.....	90
3.4.3.1.	Introducción.....	90
3.4.3.2.	Objetivo general.....	92
3.4.3.3.	Objetivos científicos.....	92
3.4.3.4.	Integrantes CECS participantes en la campaña a terreno.....	92
3.4.3.5.	Duración.....	92
3.4.3.6.	Materiales utilizados.....	92
3.4.3.7.	Logística.....	94
3.4.3.8.	Resultados de las actividades realizadas.....	94
3.4.3.9.	Dificultades técnicas.....	96
3.4.3.10.	Conclusiones.....	96
3.4.3.11.	Descripción de actividades por día.....	96
3.4.3.11.1.	1 ^{er} día: 24/03/2009.....	96
3.4.3.11.2.	2 ^{do} día: 25/03/2009.....	96
3.4.3.11.3.	3 ^{er} día: 26/03/2009.....	97
3.4.3.11.4.	4 ^{to} día: 27/03/2009.....	99
3.4.3.11.5.	5 ^{to} día: 28/03/2009.....	99
3.4.3.11.6.	6 ^{to} día: 29/03/2009.....	100
3.4.4.	Terreno 4: Mayo 2009.....	100
3.4.4.1.	Introducción.....	100
3.4.4.2.	Objetivo general.....	100
3.4.4.3.	Objetivos científicos.....	100
3.4.4.4.	Integrantes participantes en la campaña a terreno.....	100
3.4.4.5.	Duración.....	101
3.4.4.6.	Materiales utilizados.....	101
3.4.4.7.	Logística.....	101
3.4.4.8.	Resultados de las actividades realizadas.....	101
3.4.4.9.	Dificultades técnicas.....	103
3.4.4.10.	Conclusiones.....	103
3.4.4.11.	Descripción de actividades por día.....	103
3.4.4.11.1.	1 ^{er} día: 06/05/2009.....	103
3.4.4.11.2.	2 ^{do} día: 07/05/2009.....	103
3.4.4.11.3.	3 ^{er} día: 08/05/2009.....	103
3.4.4.11.4.	4 ^{to} día: 09/05/2009.....	103
3.4.5.	Terreno 5: Octubre-Noviembre 2009.....	104
3.4.5.1.	Introducción.....	104
3.4.5.2.	Objetivo general.....	104
3.4.5.3.	Objetivos científicos.....	104
3.4.5.4.	Integrantes participantes en la campaña a terreno.....	104
3.4.5.5.	Duración.....	104
3.4.5.6.	Materiales utilizados.....	105
3.4.5.7.	Logística.....	105
3.4.5.8.	Resultados de las actividades realizadas.....	105
3.4.5.9.	Dificultades técnicas.....	111
3.4.5.10.	Conclusiones.....	111
3.4.5.11.	Descripción de actividades por día.....	111
3.4.5.11.1.	1 ^{er} día: 28/09/2009.....	111
3.4.5.11.2.	2 ^{do} día: 29/09/2009.....	111
3.4.5.11.3.	3 ^{er} día: 30/09/2009.....	111
3.4.5.11.4.	4 ^{to} día: 01/10/2009.....	112
3.4.5.11.5.	5 ^{to} día: 02/10/2009.....	112
3.4.5.11.6.	6 ^{to} día: 03/10/2009.....	112
3.4.5.11.7.	7 ^{to} día: 04/10/2009.....	112
3.4.6.	Terreno 6: Noviembre 2009.....	112
3.4.6.1.	Introducción.....	112
3.4.6.2.	Objetivo general.....	113
3.4.6.3.	Objetivos científicos.....	113

3.4.6.4.	Integrantes participantes en la campaña a terreno.....	113
3.4.6.5.	Duración	113
3.4.6.6.	Materiales utilizados.....	113
3.4.6.7.	Logística	114
3.4.6.8.	Resultados de las actividades realizadas	114
3.4.6.9.	Dificultades técnicas.....	117
3.4.6.10.	Conclusiones.....	117
3.4.6.11.	Descripción de actividades por día	117
3.4.6.11.1.	1 ^{er} día: 17/11/2009.....	117
3.4.6.11.2.	2 ^{do} día: 18/11/2009	117
3.4.6.11.3.	3 ^{er} día: 19/11/2009	118
3.4.6.11.4.	4 ^{to} día: 20/11/2009.....	118
3.4.6.11.5.	5 ^{to} día: 21/11/2009.....	118
3.4.6.11.6.	6 ^{to} día: 22/11/2009.....	118
3.4.6.11.7.	7 ^{to} día: 23/11/2009.....	119
3.4.7.	Terreno 7: Diciembre 2009	119
3.4.7.1.	Introducción.....	119
3.4.7.2.	Objetivo general	119
3.4.7.3.	Objetivos científicos	119
3.4.7.4.	Integrantes	119
3.4.7.5.	Duración	120
3.4.7.6.	Materiales utilizados.....	120
3.4.7.7.	Logística	120
3.4.7.8.	Resultados de las actividades realizadas	120
3.4.7.9.	Dificultades técnicas.....	121
3.4.7.10.	Conclusiones.....	121
3.5.	Procesamiento y análisis preliminar de datos obtenidos en terreno.....	123
3.5.1.	Glaciar Universidad.....	123
3.5.1.1.	Cambios de elevación entre 2000 y 2009.....	123
3.5.1.2.	Balizas instaladas.....	125
3.5.1.3.	Acumulación de nieve y mediciones con Mt. Rose.....	126
3.5.1.4.	Estación Meteorológica Zona de Ablación Glaciar Universidad	128
3.5.1.5.	Modelo de ablación Grado día (Degree day factor).....	131
3.5.1.6.	Estación Meteorológica Zona de Acumulación Glaciar Universidad	134
3.5.1.7.	Estación Fluviométrica Glaciar Universidad.....	134
3.5.1.8.	Espesor de Hielo	134
3.5.2.	Glaciar Mocho	136
3.5.2.1.	Introducción.....	136
3.5.2.2.	Reporte de balance de masa año 2009.....	139
3.5.2.3.	Instalación de Estación Fluviométrica.....	142

1. ANEXO: Modelamiento hidrológico en cuencas glaciares

La investigación bibliográfica que se presenta a continuación tiene como objetivo exponer los principales tipos de modelos hidrológicos existentes, y asimismo algunos estudios que muestran la aplicación de modelos específicos a cuencas de diversas partes del mundo.

Un modelo hidrológico tiene como finalidad representar las condiciones y características específicas principales de una cuenca. En el marco de la presente investigación, se estudian diversos ejemplos para enseguida seleccionar aquellos modelos (o parte de ellos) que a nuestro juicio sean más idóneos para ser aplicados a las condiciones de las cuencas hidrológicas en Chile.

1.1. DEFINICIÓN DE MODELAMIENTO HIDROLÓGICO

Un modelo se define como una representación simplificada de un proceso o de un sistema. En general, definimos un modelo por su capacidad de permitir razonar acerca de un(os) fenómeno(s) tomando en cuenta entidades o procesos elementales o que permita reconstituirlos por combinación; un modelo es, en consecuencia, necesariamente reduccionista de la complejidad natural (Makhlouf, 1994).

Según (Musy *et al.*, 2002), un modelo es una representación esquemática de un fenómeno físico realizada con el objetivo de estudiarlo mejor o de analizar la influencia que él (fenómeno) ejerce. Dicha representación puede ser matemática o física. En el primer caso el modelo es el resultado de expresiones analíticas de la realidad observada y se presenta generalmente bajo la forma de un conjunto de ecuaciones. Los modelos físicos corresponden a representaciones conceptuales o “tipo” maqueta.

Existen numerosos tipos de modelos hidrológicos clasificados de acuerdo al tipo de representación. La selección de un tipo de modelo determinado es compleja debido a la gran diversidad de tipos de modelo. Según Musy *et al.*, (2002) algunos de los criterios que se deben tomar en cuenta en el momento de seleccionar un modelo son: el objetivo del estudio, la simplicidad (el modelo debe ser lo más simple posible), el tiempo de observaciones y su escala de tiempo.

1.2. TIPOS DE MODELOS HIDROLÓGICOS

1.2.1. Modelos distribuidos y globales

Para representar el contexto geográfico en la modelación hidrológica, existen dos opciones. La primera corresponde al modelo global donde se

considera que las variaciones espaciales de los parámetros y las variables de entrada tienen un efecto no significativo y que no es necesario dividir el espacio. Al contrario, cuando el contexto geográfico es heterogéneo se debe construir un modelo distribuido para el cual se puede dividir el espacio en grillas de tamaño regular por ejemplo.

También existen los modelos de tipo semi-distribuido cuando en un modelo global se intenta tomar en cuenta la heterogeneidad del medio y se divide el espacio en parcelas ficticias que representen distintos tipos de ocupación de suelo.

1.2.2. Modelos estocásticos y deterministas

Un modelo estocástico corresponde a aquel en que las variables de entrada y los parámetros de error son variables aleatorias. En contraposición, si ninguno de los parámetros del modelo es aleatorio corresponde a un modelo determinista.

1.2.3. Modelos dinámicos y estáticos

Un modelo es dinámico cuando algunas de sus variables evolucionan en el transcurso del tiempo. Al contrario, cuando todas las variables y parámetros son independientes del tiempo se trata de un modelo estático.

1.2.4. Modelos continuos y discontinuos

Los modelos continuos simulan la evolución de una variable de estado del sistema continuamente, reproducen el comportamiento del sistema a largo plazo. En cambio los modelos discontinuos funcionan evento por evento. Este tipo de modelo trabaja con escalas de tiempo bastante reducidas y tiene por objetivo describir en detalle la respuesta del sistema a lo largo de un evento particular.

1.2.5. Modelos mecánicos, conceptuales y empíricos

Los modelos mecánicos describen los mecanismos internos del sistema basándose sobre las leyes de la física y sobre un detallado conocimiento de la estructura física del sistema. Los modelos conceptuales integran factores complejos, tratando de describir el concepto físico del comportamiento del sistema en una representación más simple, y son, por lo tanto, reductores de la complejidad natural. Los modelos empíricos no se refieren a los procesos internos del sistema, sólo establecen relaciones entre las variables de forzamiento y las variables de salida.

1.3. MODELAMIENTO HIDROLÓGICO EN CUENCAS NO GLACIARES

Como resultado de una investigación bibliográfica de los diferentes modelos hidrológicos aplicados en diversas cuencas del mundo, se seleccionaron los nueve modelos que presentan uno o más aspectos interesantes (como por ejemplo la semejanza de zonas de estudio o las facilidades de aplicación) que podrían ayudar a realizar un modelamiento hidrológico en cuencas de los Andes chilenos.

1.3.1. El modelo Génie Rural à 2 paramètres Mensuel (GR2M) (Makhlouf, 1994); (Perrin *et al.*, 2007)

El modelo Génie Rural à 2 paramètres Mensuel (GRM2) propone relaciones de comportamiento simples a la escala de una cuenca. Dichas relaciones han sido establecidas de forma empírica y sin relaciones directas con la física de los procesos a escala pequeña. El modelo GRM2 es un modelo lluvia-caudal de tipo global, lo que quiere decir que la cuenca es considerada como una sola unidad donde se estudia como prioridad el comportamiento del promedio espacial. El modelo trabaja con un promedio temporal mensual. Utiliza dos variables de entrada (precipitación y evapotranspiración) y dos parámetros de calibración (un factor de producción y la capacidad de retención de agua del suelo) y se asemeja a los modelos conceptuales de reservorios (por ejemplo Jansson *et al.*, 2003). El comportamiento hidrológico de la cuenca se simula en base a una estructura que asocia un reservorio de producción, un reservorio de ruta (o encaminamiento) y una apertura hacia el exterior distinta que el medio atmosférico. El modelo funciona con dos parámetros, la capacidad de producción del reservorio y el coeficiente de intercambios subterráneos. Los parámetros del modelo deben ser determinados por calibración minimizando los errores mediante una serie de datos de caudal observado.

1.3.2. El modelo Hydrologic Routing Algorithm (HYDRA) (Coe, 2000)

El modelo hidrológico HYDRA (Hydrologic Routing Algorithm) es un modelo de tipo distribuido que permite la representación de la dinámica de ríos, lagos y zonas húmedas. HYDRA corresponde a una versión modificada del modelo SWAM (Surface Water Area Model (Coe, 2000).

El modelo SWAM da cuenta de los procesos hidrológicos de lagos, ríos y zonas húmedas de manera simultánea, dinámica y conectada y al mismo tiempo los hace evolucionar en función de los escurrimientos superficiales y de zonas de almacenamiento (reservorios). Dicho modelo entrega como resultado los cambios de caudal de la zona de estudio derivando el recorrido de ríos y volúmenes de los reservorios a partir de un modelo digital de elevación (MDE) que corresponde a la información de base del modelo.

HYDRA se basa sobre los mismos principios que SWAM, la principal diferencia entre ambos corresponde al intervalo de tiempo de las variables

climáticas de entrada: en SWAM se ingresan a un intervalo anual, mientras que en HYDRA se ingresan a un intervalo mensual, lo que permite incorporar el análisis de la estacionalidad.

Desde el punto de vista espacial, en HYDRA la cuenca se divide en píxeles cuyo tamaño está determinado por la resolución espacial del MDE utilizado. Luego, el modelo que se basa principalmente en la topografía, reposa en dos principios de base; i) La definición de la red hidrográfica se basa en el MDE y permite la determinación de áreas potenciales de acumulación de agua, vale decir depresiones, (en inglés Potential Water Areas, PWA, sigla que se adoptará en la redacción de este informe) así como la localización de salidas de agua; ii) HYDRA utiliza un sistema lineal de reservorios para representar la transferencia de escurrimientos de superficie y de sub superficie a lo largo de la red hidrográfica.

El transporte de escurrimientos se representa a través de 3 reservorios (río, superficie y sub-superficie. Los datos de entrada necesarios para la aplicación del modelo HYDRA corresponden a los datos del medio (o entradas geomorfológicas) y datos climáticos (precipitación líquida, precipitación sólida y evaporación).

1.4. MODELAMIENTO HIDROLÓGICO EN CUENCAS GLACIARES

Existe una amplia literatura sobre modelos de escurrimiento de origen glaciar, con aplicaciones en diversas cadenas montañosas del mundo. Uno de los trabajos pioneros corresponde al realizado por Baker *et al.*, (1982), quienes, a través de una modelación hidrológica, calcularon el caudal proveniente del glaciar Vernagtferner ubicado en Austria.

El estudio realizado por Casassa *et al.*, (2009a) presenta una síntesis de tendencias publicadas de escurrimiento de origen glaciar a nivel global, donde se indica la relevancia de las variaciones de área y volumen experimentados por el glaciar en los caudales efluentes correspondientes. Como respuesta al calentamiento atmosférico, los glaciares experimentan inicialmente un aumento del derretimiento, lo que se traduce en un principio en un aumento de los caudales hasta alcanzar un cierto punto crítico, después del cual los glaciares se reducen significativamente y los caudales comienzan a disminuir inexorablemente (Casassa *et al.*, 2009a). Por ejemplo, en Asia Central y Perú, donde existen aun grandes glaciares en las cuencas altas, se han observado tendencias de aumento de caudales. En Canadá y los Alpes, en cambio, se observa un aumento de caudales en las cuencas septentrionales y cuencas altas, respectivamente, mientras que en las cuencas meridionales y las cuencas bajas, respectivamente, los caudales ya han experimentado una disminución debido a la relevante disminución de la cubierta de glaciares.

A continuación se presentan siete ejemplos modelos hidrológicos específicos aplicados a cuencas glaciares de los Andes, los Alpes e Islandia.

1.4.1. Modelamiento hidrológico en la cuenca del Río Santa, Cordillera Blanca, Perú (Suárez, 2007; Suárez *et al.*, 2008)

Suárez (2007) y Suárez *et al.*, (2008) aplicaron un modelo semi-distribuido en la cuenca del lago Parón, Cordillera Blanca, Perú (Figura 1.1). La zona de estudio es de tipo tropical y existen glaciares sobre los 5.000 m que presentan un escurrimiento perenne. El régimen hidro-meteorológico exhibe una estación húmeda que corresponde al período de máxima precipitación y fusión, y una estación seca con precipitación y fusión mínimas.

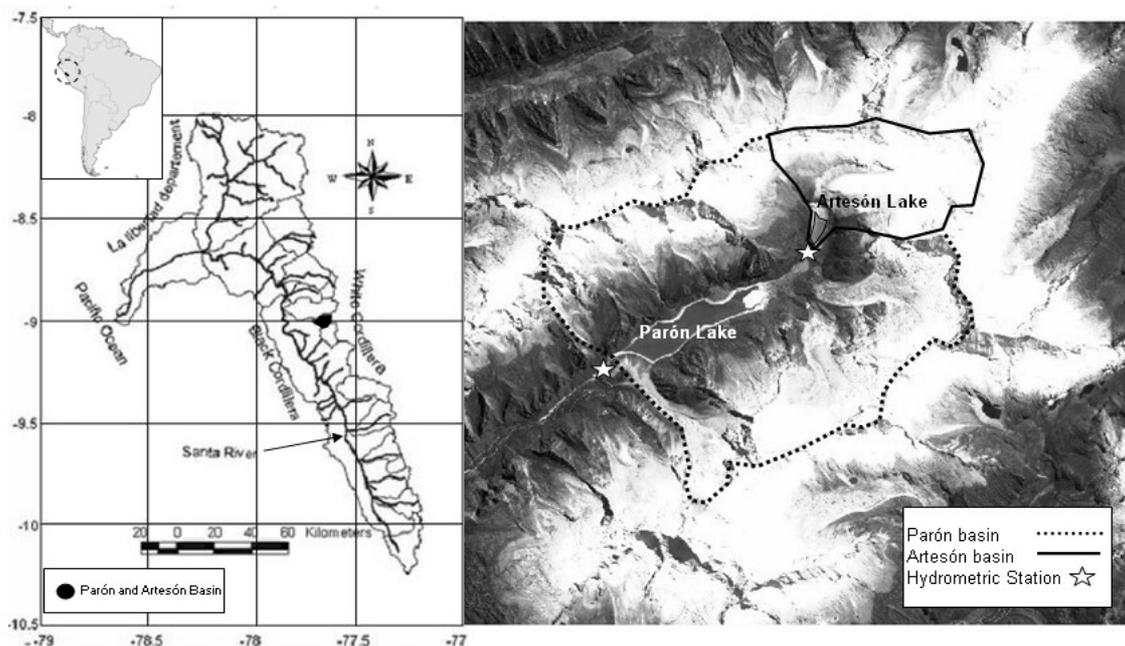


Figura 1.1. Cuenca del lago Parón, Cordillera Blanca, Perú. Suárez *et al.*, (2008)

El modelo hidrológico aplicado por Suárez (2007) y Suárez *et al.*, (2008) tuvo como objetivo comprender mejor el funcionamiento hidrológico de la cuenca del Río Santa, predecir la distribución futura de los recursos hídricos que se generan en ella y analizar los diferentes escenarios climáticos bajo los cuales la zona de estudio podría estar sometida. Los tres puntos anteriores se analizaron solamente en función de las variables de precipitación y temperatura.

Los datos disponibles corresponden a las series de datos hidro-meteorológicos a partir del año 2001 en las cercanías de las zonas glaciares de la cuenca así como de series más extensas (1950 – 1998) de zonas aledañas. También se utilizaron los datos de temperatura de Reanálisis NCEP/NCAR para la reconstrucción de las series de datos observados.

El período de tiempo escogido corresponde a la escala mensual debido principalmente a la disponibilidad de datos y a que el estudio no busca comprender en forma detallada los fenómenos físicos que rigen el sistema hidrológico de la cuenca, sino más bien modelar el escurrimiento bajo distintos escenarios climáticos.

El modelo aplicado es de tipo teórico-conceptual al que se añadió una espacialización semidistribuida para diferenciar los procesos de la zona glaciar (asumiendo como hipótesis que el área/volumen glaciar es constante) de aquellos procesos en la zona no glaciar para así estudiar ambas zonas con dos enfoques diferentes.

Para el análisis nivo-glaciar se consideró una simplificación del modelo grado-día y dentro de esta zona se identificaron dos áreas: una contributiva y otra no contributiva al escurrimiento. Ambas zonas son separadas según la posición de la línea de nieve la que depende de la temperatura del aire (parámetro de calibración) y separa la precipitación líquida (bajo la línea de nieve y contributiva al escurrimiento) de la precipitación sólida (sobre la línea de nieve y no contributiva al escurrimiento).

Para modelar el escurrimiento de la zona contributiva se aplicó el modelo propuesto por Baker *et al.*, (1982) en el que el escurrimiento nivo-glaciar se distribuye en tres reservorios paralelos que representan la nieve, el hielo y la neviza. En el presente estudio se simplificó el modelo conservando en la ecuación solamente el reservorio correspondiente al hielo.

Para cuantificar el escurrimiento de la zona no glaciar (que fue considerada como una superficie global única donde el caudal final es modelado solamente en el punto de desagüe) se aplicó, en un período mensual, el modelo conceptual GRM2. Para este estudio el modelo GR2M fue modificado con el fin de tomar en cuenta tres reservorios: suelo, lago y glaciar y fue aplicado inicialmente a la sub cuenca de Artesón (debido a la disponibilidad de datos). Los resultados fueron comparados con los datos de temperatura. Al comparar la relación que existe entre el caudal observado y la temperatura a aquella que entre el caudal modelado y la temperatura, se observa que el último presenta diferencias sobre todo en los caudales máximos, probablemente debido a la influencia del episodio “La Niña”.

Una vez que se aplicó el modelo en la sub cuenca de Artesón, se seleccionó una combinación de parámetros para aplicarla posteriormente a la sub cuenca Parón. Los resultados fueron evaluados usando el criterio de Nash, que corresponde a una función de validación de un modelo hidrológico del tipo adimensional que se calcula en base al caudal observado y calculado para el período de calibración como también el caudal promedio observado del mismo período (Nash & Stueliffe, 1970). Enseguida el modelo fue aplicado a 11 subcuencas de la cuenca del Río Santa. Con el fin de identificar las variables más importantes se realizó un test de sensibilidad a los parámetros del modelo en tres sub cuencas: Artesón, Pachacoto y Llanganuco. El test fue aplicado a 5 parámetros, tres de ellos correspondientes a la zona glaciar (temperatura de calibración, constante de respuesta, factor de fusión del hielo) y dos de ellos correspondientes a la zona no glaciar (capacidad de retención de agua del suelo y el ajuste de la función de producción). Como resultado se obtuvo que el modelo aplicado es principalmente controlado por la temperatura tanto en las sub cuencas con alto porcentaje de superficie glaciar como en aquellas en que la superficie glaciar es más reducida.

Se concluyó que la principal ventaja de este modelo es que requiere poca información de entrada (temperatura del aire, precipitación y

evapotranspiración). Como resultado de la aplicación a 11 sub cuencas se observa que existen ciertas limitantes del modelo para representar el escurrimiento mensual máximo. Esto se debe principalmente a las hipótesis realizadas acerca de la zona glaciar así como a la calidad de los datos pluviométricos que es determinante para el correcto funcionamiento del modelo.

1.4.2. Modelamiento hidrológico en diversas cuencas de la Cordillera Blanca, Perú (Pouyaud *et al.*, 2005)

Pouyaud *et al.*, (2005) utilizaron datos mensuales de escurrimiento de la cuenca Llanganuco y de Artesonraju, Cordillera Blanca, Perú, para representar la variabilidad de los recursos hídricos de las cuencas de superficies medianas en el transcurso de la segunda mitad del siglo XX. La temperatura del aire sobre la Cordillera Blanca se extrajo de datos de Reanálisis NCEP/NCAR.

El modelamiento presentado en el estudio de Pouyaud *et al.*, (2005) se divide en dos partes. La primera parte muestra un modelamiento basado en la relación existente entre la tasa de superficie glaciar y la temperatura y se proyecta el escurrimiento de la cuenca de Llanganuco hasta el año 2020. En la segunda parte, se expone un modelamiento exploratorio que considera una proyección del escurrimiento a largo plazo en un contexto de retroceso glaciar.

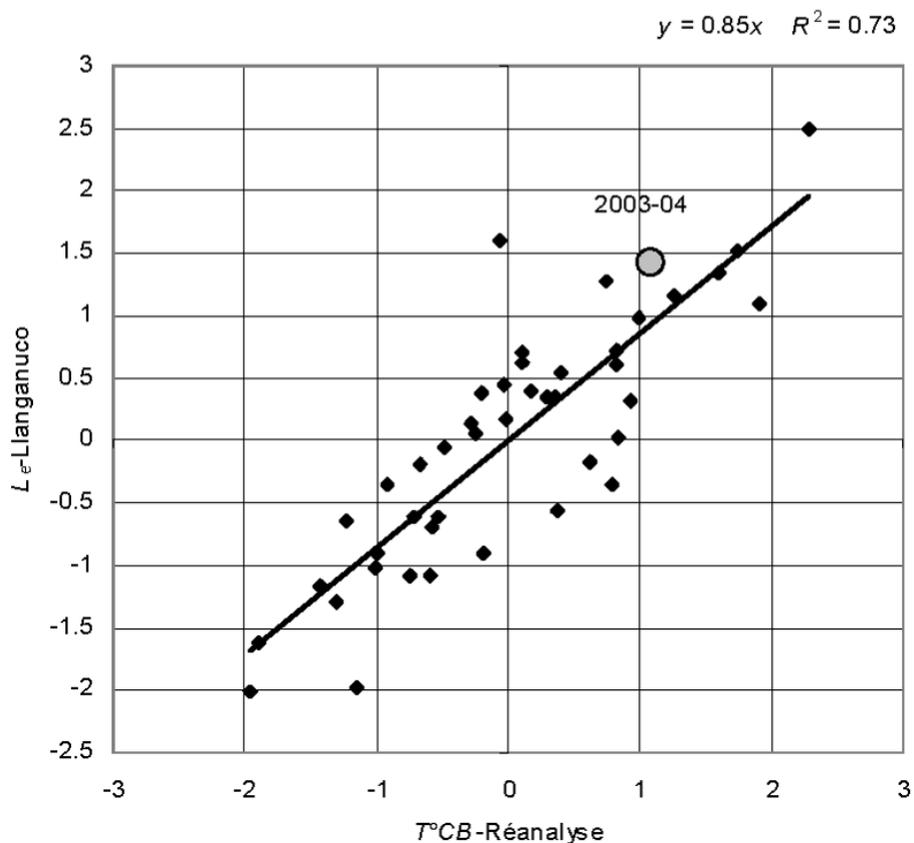


Figura 1.2. Correlación entre escurrimiento (anual) y temperatura del aire (anual) extraída de Reanálisis NCEP/NCAR (43 años, $R^2=0,73$), con indicación de la posición de los datos correspondientes al año hidrológico 2003-2004 (Pouyaud *et al.*, 2005).

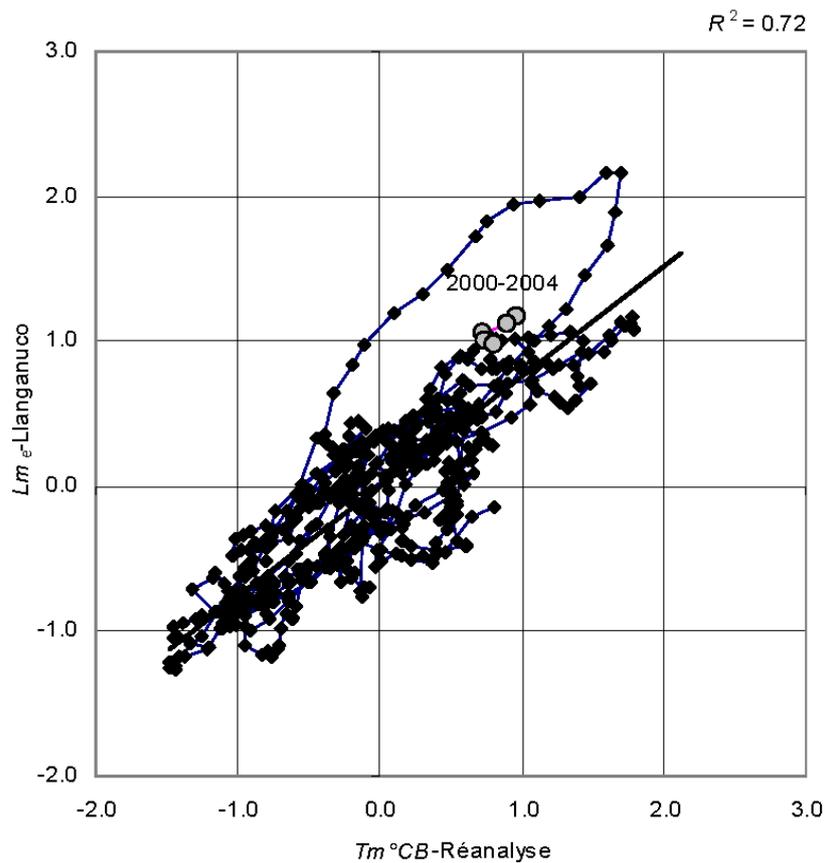


Figura 1.3. Correlación entre escurrimiento (mensual) y temperatura del aire (mensual) extraída de Reanálisis NCEP/NCAR (663 meses, $R^2=0,72$), con indicación de la posición de los datos mensuales correspondientes a los años 2003 y 2004 (Pouyaud *et al.*, 2005).

Para la proyección hasta el año 2020, en el caso de la cuenca de Llanganuco, el estudio de la variabilidad interanual de los recursos hídricos glaciares se realiza analizando los datos anuales y mensuales de escurrimiento entre 1953 y 1997 y se comparan con series de temperatura de Reanálisis NCEP/NCAR. En una primera etapa se confirma una estrecha relación lineal entre escurrimiento y temperatura de la alta atmósfera a una escala de tiempo mensual y anual (Figura 1.2 y Figura 1.3). Luego, se estima que la temperatura atmosférica mensual constituye un buen indicador (proxy) del recurso hídrico a la escala de sub-cuencas con alto porcentaje de superficie glaciar (>40%). A partir de esta relación se obtiene una ecuación que permite reconstituir los valores medios normalizados de escurrimiento correspondientes a valores medios normalizados de la temperatura. Se considera la hipótesis de que en las cuencas de alto porcentaje de superficie glaciar, a la escala de 20 años, la reducción de superficie glaciar no debería ser muy importante como para modificar los procesos de fusión y, por lo tanto, de escurrimiento y que la relación con la temperatura de la alta atmósfera se mantiene constante e igual a los últimos 50 años. Luego, extrapolando los resultados de previsiones de la temperatura de los modelos globales a una escala regional para los próximos 20 años se simula la evolución del escurrimiento para el mismo período a partir de la regresión lineal establecida entre los valores medios normalizados de escurrimiento y de temperatura. Para esta previsión se calibraron los datos de temperatura de Reanálisis usando las proyecciones de modelos climáticos. Así se obtuvo una previsión del escurrimiento de la cuenca de Llanganuco hasta el año 2020, suponiendo que las correlaciones establecidas previamente no presentan cambios. Este modo de funcionamiento no se justificaría frente a un

contexto de retroceso glaciar que modificaría la relación entre escurrimiento y temperatura del aire.

Para la proyección del escurrimiento a largo plazo se intenta separar las contribuciones de la superficie glaciar de aquella no glaciar. Para este modelamiento se incluye la precipitación. Se asume en una primera aproximación, que el funcionamiento de la parte con régimen pluvio-glacial (superficie no-glaciar) no es modificado drásticamente por el aumento consecuente del derretimiento glaciar y por la reducción progresiva de la superficie glaciar. Para el modelamiento, la precipitación es asimilada a valores constantes basado en que no existen previsiones fiables de la evolución de la precipitación a la escala regional. Además la precipitación observada durante los últimos 50 años no presenta tendencias particulares en la Cordillera Blanca.

Las simulaciones se realizaron para las siguientes cuencas de alto porcentaje de superficie glaciar: Llanganuco, Parón, Artesoncocha y Yanamarey. Como resultado del modelamiento se proyecta un ligero aumento del recurso hídrico de origen glaciar durante 25 a 50 años según el porcentaje de superficie glaciar actual de cada cuenca. Luego, si el cambio climático actual continua o se acelera, habrá una escasez del recurso hídrico de origen glaciar. Adicionalmente, el régimen hidrológico de cada cuenca se transformará hacia un régimen pluvio-nival.

El modelamiento descrito en este estudio corresponde a una primera aproximación para la proyección de los recursos hídricos de la Cordillera Blanca. A futuro, este trabajo debería ser mejorado incluyendo un modelamiento del funcionamiento físico y del retroceso de los glaciares según los escenarios de cambio climático.

1.4.3. Modelamiento de escurrimiento observado y futuro en la cuenca de Llanganuco Cordillera Blanca, Perú (Juen *et al.*, 2007)

Juen *et al.*, (2007) aplicaron un modelo de esorrentía glaciar a la cuenca de Llanganuco, Cordillera Blanca, Perú, la cual tiene un 34,3% de fracción glaciar. El modelo se denomina ITGG-2.0-R, el que a su vez se basa en un modelo de balance de masa homónimo que fue derivado a partir de un modelo vertical de balance (VBP). Dicho modelo utiliza una relación grado-día y también depende de la humedad atmosférica, este último siendo un factor relevante en los trópicos. La radiación de onda corta, el albedo, la emisividad atmosférica y la razón entre sublimación y fusión se derivan de la precipitación a partir de un paso de calibración intermedio. El modelo contempla una cuenca englaciada con esorrentía que se puede descomponer en esorrentía directa y asimismo esorrentía desfasada en el tiempo. Se toman en cuenta la precipitación sólida, precipitación líquida, evapotranspiración en cuencas no glaciadas y sublimación.

El modelo logra simular adecuadamente una serie de caudales medios mensuales de 44 años de 1953 a 1997 basado en temperaturas atmosféricas medidas en la estación Querococha y también en temperaturas derivadas del

Reanálisis NCEP-NCAR. En ambos casos el coeficiente de correlación es de 0,75. Para caudales medios anuales el coeficiente de correlación es de 0,99.

Se asumen 4 escenarios futuros de cambio climático a partir de evaluaciones del IPCC (a1-bajo, b2-medio, a1-medio y a1-alto), con aumentos de temperatura que oscilan entre +1,45 °C y +4,67 °C y aumentos de precipitación entre +3,5% y +13,0% para 2080. Basado en observaciones históricas de cambios de áreas de glaciares para la Cordillera Blanca se asume una variación futura de la cubierta glaciar en que la superficie de hielo disminuye en un rango del 49% al 75% del área original medida en el año 1990. La disminución del área glaciar produce una disminución de la fusión de hielo, que se compensa por un aumento en la escorrentía directa producto del aumento de precipitación líquida. Sin embargo, el caudal medio anual permanece casi invariante, mientras que la estacionalidad es amplificada considerablemente, con un aumento de la escorrentía durante la época húmeda. Durante la época seca, cuando los caudales están dominados por la fusión glaciar, la escorrentía se reduce en un 23%, efecto que los autores indican que afectará severamente el manejo de los recursos hídricos.

1.4.4. Modelamiento hidro-glaciológico en el valle Zinal, Valais, Suiza (Huss *et al.*, 2008)

Huss *et al.*, (2008) desarrollaron un modelo hidro-glaciológico denominado Glacier Evolution Runoff Model (GERM), el cual fue aplicado al valle Zinal, Valais, Suiza (Figura 1.4). Dicho valle está rodeado de cumbres que alcanzan los 4.500 m y que incluye los glaciares Zinal (11,4 km²), Moming (6 km²) y Weisshorn (2,7 km²).

El modelo GERM tiene la importante particularidad de incluir los cambios producidos en los glaciares introduciendo como componentes del sistema del balance de masa glaciar, la evaporación, el caudal, y el cambio en la topografía superficial del glaciar.

El presente estudio, que se focaliza en la transición de descarga desde condiciones glaciares a condiciones de superficie sin glaciar, expone un modelo glacio-hidrológico que incluye la evolución anual de la topografía glaciar superficial y determina todos los componentes del balance hídrico en terreno alpino a una alta resolución espacial y temporal. El modelo requiere pocos datos de entrada y es capaz de realizar predicciones acerca de la evolución transitoria del volumen de hielo, del escurrimiento y del régimen de descarga.

El modelo GERM se basa en un modelo grado-día distribuido que incluye acumulación. La evaporación, ruta de escurrimiento y la evolución de la superficie glaciar son descritas en sub-rutinas. Posteriormente GERM es forzado de acuerdo a diferentes escenarios climáticos a la escala estacional. Como resultado se presentan la evolución del área glaciar, del balance de masa y del escurrimiento para el período 2007-2100. También se investiga la distribución intra-anual del escurrimiento.

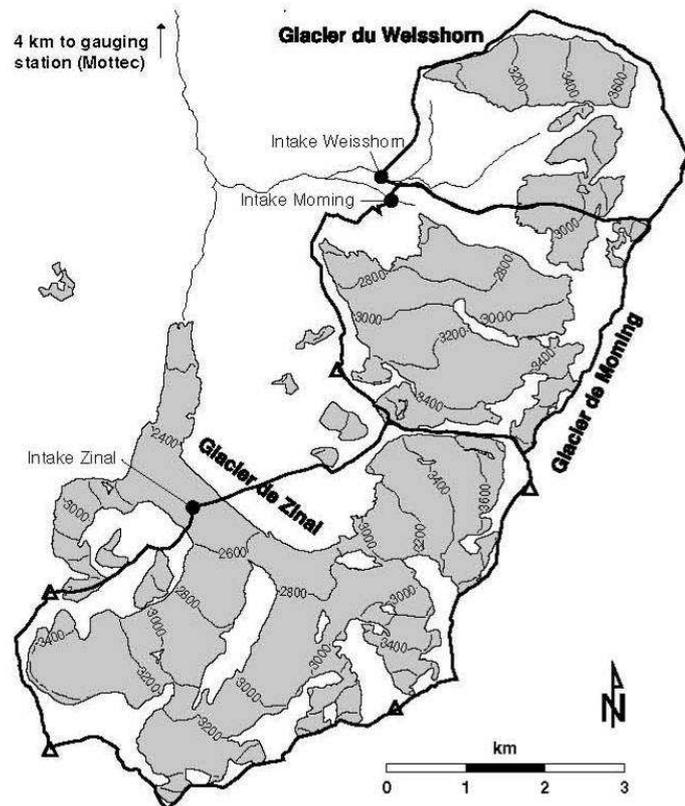


Figura 1.4. Mapa de la zona de estudio. Los puntos negros representan áreas de captura de agua (de origen glaciar) para la generación de energía hidroeléctrica. Las áreas glaciares se representan con color gris y las cuencas estudiadas se delimitan con una línea negra (Huss *et al.*, 2008).

Para el estudio se dispusieron datos meteorológicos (temperatura y precipitación). Los datos de temperatura fueron corregidos según la variación espacial aplicando un gradiente altitudinal (lapse rate) calculado en base a datos de estaciones meteorológicas aledañas. La distribución espacial de la precipitación se obtuvo a partir de los resultados del modelo engrillado PRISM (Parameter-elevation Regressions on Independent Slopes Model) (Daly *et al.*, 2002) de 2 km de resolución espacial. Las fluctuaciones temporales de la precipitación fueron escaladas a aquellas medidas en las estaciones meteorológicas, obteniendo así series de datos diarios de temperatura y precipitación. También se dispuso de caudal mensual (1979 – 2006), observaciones de la altura de la línea de equilibrio, cuatro modelos digitales de elevación (resolución espacial de 25 m) en distintas épocas que permitieron calcular los cambios decadales del volumen glaciar, y datos de espesor de hielo a partir de mediciones de radio-eco sondaje. Para la estimación de la distribución espacial del espesor de hielo de las zonas no cubiertas con radio-eco sondaje se usó un método teórico que permite el cálculo de espesor en función del flujo de hielo en estado estacionario, el ancho del glaciar y la pendiente de superficie. Luego, el espesor de hielo fue sustraído de la topografía superficial suavizada del glaciar.

Los componentes del modelo de cambio glaciar y de escurrimiento son: (i) el balance de masa glaciar, calculado usando un modelo de acumulación acoplado a un modelo distribuido de derretimiento índice-temperatura; (ii) la

evaporación estimada según un modelo de evaporación empírico basado en el cálculo de evaporación potencial de Hamon (1961); (iii) rutas del escurrimiento, determinadas a escala diaria para cada píxel resolviendo el balance hídrico usando las cantidades de precipitación líquida, derretimiento y evaporación. El agua es encaminada a través de dos reservorios lineares paralelos (uno rápido y uno lento) y (iv) cambio en la superficie glaciar y retroceso glaciar a escala anual.

El modelo fue ejecutado a una resolución espacial de 25 m y a escala diaria. Para su calibración se consideró los cambios de volumen del hielo derivados de los MDEs de las últimas 4 décadas, observaciones de la ELA y mediciones mensuales de volúmenes de escurrimiento registrados en la estación de Mottet durante 27 años.

Se presentan resultados para 3 cuencas de drenaje para el período 2007 – 2100. Las series de parámetros glaciológicos e hidrológicos se analizan considerando 3 escenarios de cambio climático (basados en simulaciones del proyecto PRUDENCE) asumiendo tendencias de temperatura de $+3,8 \pm 2,4$ °C y cambios de precipitación de $-6 \pm 21\%$ por siglo: el escenario 1 (frío-húmedo) adopta la expectativa más baja de aumento de temperatura; el escenario 2 es uno intermedio; y el escenario 3 es uno cálido-seco. Los resultados del modelo en el futuro son comparados con el período climático “normal” 1961–1990. Para dicho período el modelo GERM fue forzado usando variables meteorológicas medidas. En los tres escenarios el área y volumen glaciar disminuyen significativamente y se espera que el balance de masa glaciar sea negativo en el futuro. El volumen de escurrimiento anual muestra un patrón uniforme para las 3 cuencas de drenaje analizadas. El escurrimiento aumenta en el futuro cercano debido a la reducción de masas de hielo. Mientras más grande sea la reducción de las áreas glaciares mayor será la contribución de la precipitación al escurrimiento. Después de varias décadas, los glaciares reducen sus superficies considerablemente y habrán retrocedido hacia mayores elevaciones, sin poder aportar mucha más agua de derretimiento adicional. Lo anterior implica que el derretimiento glaciar tiene un impacto muy importante en el escurrimiento durante períodos intermedios pero es muy bajo hacia el final del siglo XXI.

El ciclo de escurrimiento anual fue evaluado para períodos pasados y para 4 épocas en el futuro. Primero, se predice un aumento substancial del escurrimiento durante los meses de verano y un aumento significativo en la duración de la estación de derretimiento. Hay un retardo paulatino del peak de escurrimiento durante aproximadamente las dos primeras décadas y luego hay un adelanto del peak desde fines de Julio-Junio hacia Mayo-Junio. Este cambio está relacionado con la disminución de masas de hielo y corresponde a la transición de un régimen dominado por el derretimiento glaciar hacia un régimen hidrológico dominado por un derretimiento nival.

El modelo predice una disminución significativa de escurrimiento durante los meses de verano mientras que aumenta durante la estación de otoño y en particular en primavera.

1.4.5. Respuesta de Hofsjökull y Vatnajökull Sur (Islandia) frente a cambios climáticos en los próximos 2 siglos (Aðalgeirsdóttir *et al.*, 2006)

En este estudio se evalúa el estado actual y la respuesta de los glaciares de los casquetes de hielo de Hofsjökull y Vatnajökull Sur, Islandia, frente a posibles cambios climáticos estimados según modelos globales transformados a modelos climáticos regionales. También se estimaron las consecuencias hidrológicas frente a cambios de balance de masa y de geometría glaciar.

Para analizar la respuesta de los glaciares de los casquetes de hielo de Hofsjökull y Vatnajökull Sur (a excepción de los glaciares tipo surge) frente a los cambios climáticos se aplicó en forma acoplada un modelo de balance de masa (grado-día) de dos dimensiones y modelos de flujo glaciar.

Los datos disponibles corresponden a la topografía de superficie y del lecho rocoso medida con radio-eco sondaje entre 1980-1996, velocidad superficial y balance de masa anual medido con balizas en 35 puntos (sólo en Hofsjökull) desde 1988.

Se estudió el cambio de volumen de hielo frente a diversos escenarios climáticos y el cambio del escurrimiento (promedio anual) desde el área que estaba inicialmente cubierta por hielo. Para ello, se consideró el escenario de cambio climático (1990–2050) expuesto en el proyecto CWE (“The Climate, Water and Energy – Nordic climate scenario”, CWE-NCS) para los países nórdicos correspondientes a los escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero del IPCC. También se consideraron en el modelo los rangos de temperatura establecidos por el proyecto nórdico previo: Climate Change and Energy Production (CCEP).

En base a lo anterior se realizaron principalmente dos experimentos de aplicación del modelo. En el primero, se consideró un clima constante tomando en cuenta el período 1981-2000. En el segundo experimento, el modelo se aplicó con modificaciones climáticas a partir de 1990 según los escenarios climáticos de CWE-NCS.

Como resultado se obtuvo que en los casquetes de hielo de Hofsjökull y Vatnajökull Sur se proyecta una reducción del hielo de aproximadamente 50% en los próximos 100 años y que los casquetes de hielo desaparecerán 200 años después del año de inicio de las simulaciones bajo la condición que la tasa de calentamiento se mantenga estable. La respuesta al calentamiento es lenta en una primera etapa pero luego se acelera progresivamente. La reducción de volumen de Hofsjökull y Vatnajökull Sur es similar en todos los escenarios en las primeras décadas pero luego el escenario CCEP presenta un derretimiento más rápido para ambas zonas y resulta en una casi completa desaparición de los glaciares en 200 años. En un comienzo, un aumento de precipitación relacionado a aumentos de temperatura produce una pérdida de masa glaciar más débil, pero finalmente, el aumento de temperatura predomina y anula este efecto inverso de la precipitación.

El escurrimiento de los ríos de las áreas estudiadas aumentará aproximadamente un 30% hacia el año 2030 con respecto al escurrimiento

registrado entre 1981 y 2000, y del orden de un 50% de aumento hacia el fin del siglo XXI, para luego disminuir debido a la disminución de las áreas glaciares. Lo anterior constituye una de las consecuencias hidrológicas más importantes en el futuro cambio en el clima de Islandia.

1.4.6. Modelo de escurrimiento de la cuenca alpina glaciar Salzach (Austria): validación de resultados multidisciplinarios (Koboltschnig *et al.*, 2008)

En este estudio se presenta un modelamiento hidrológico llevado a cabo usando el Precipitation Runoff Evapotranspiration Hydrological Response unit model (PREVAH) con el objeto de simular la respuesta del Río Salzach Alto (Austria) a escala de cada 1 hora frente a los cambios climáticos. A su vez, se aplicó un método de validación multi criterio.

La discretización espacial de PREVAH se logra a través de la agregación de variables en unidades de respuesta hidrológica (URH) que representan áreas de la cuenca donde se esperan comportamientos hidrológicos similares. Todos los URH están conectados por el punto de salida de la cuenca. La característica más importante de los URH es que en ellos se agrupan elementos que se localizan en una misma unidad meteorológica, con un aspecto similar, el mismo uso de suelo y propiedades de suelo similares. La línea de equilibrio se considera para definir si las celdas de la grilla son parte del área de acumulación o de ablación del glaciar.

Luego se define un set de parámetros para cada URH usando información proveniente de un MDE, mapas de suelo, uso de suelo y características de superficie. También se consideran parámetros de la vegetación (canopy) para determinar la evapotranspiración. Para las superficies no-vegetales (nieve estacional, glaciares, rocas, grandes cuerpos de agua y áreas urbanas) se asignan parámetros separadamente.

PREVAH calcula el derretimiento basándose en 3 almacenamientos: nieve, neviza y hielo, aunque los parámetros de almacenamiento y derretimiento fueron los mismos para la neviza y el hielo. Las calibraciones para la nieve se hicieron separadamente de la neviza-hielo. Para la ejecución de PREVAH se aplicó el enfoque avanzado del índice de temperatura considerando la radiación solar y se calculó la evaporación según la fórmula de Penman.

La calibración del modelo se llevó a cabo para un período de 3 años (1/10/1999–30/09/2002) considerando el escurrimiento observado y la distribución de la nieve obtenida con imágenes de satélite. Para la validación también se consideró un período de 3 años entre 1/10/2002 y 20/09/2005. El balance de masa neto específico del glaciar fue calculado con PREVAH dividiendo el balance de masa neto en el promedio específico de la ablación neta y acumulación neta.

El escurrimiento cada una hora fue simulado para la estación Mittersill y las comparaciones con los datos observados entregan buenos resultados (Figura 1.5). Sin embargo, las simulaciones sobre estimaron sistemáticamente las superficies nivales y glaciares. También se observó que algunas zonas en

altura, donde hay pendientes que deberían estar libres de hielo o nieve, se incluyeron dentro de la cubierta de nieve. Para corregir lo anterior se calcularon las áreas de las zonas de depresiones y grandes pendientes para luego sustraerlas al área simulada y así corregir dicho efecto.

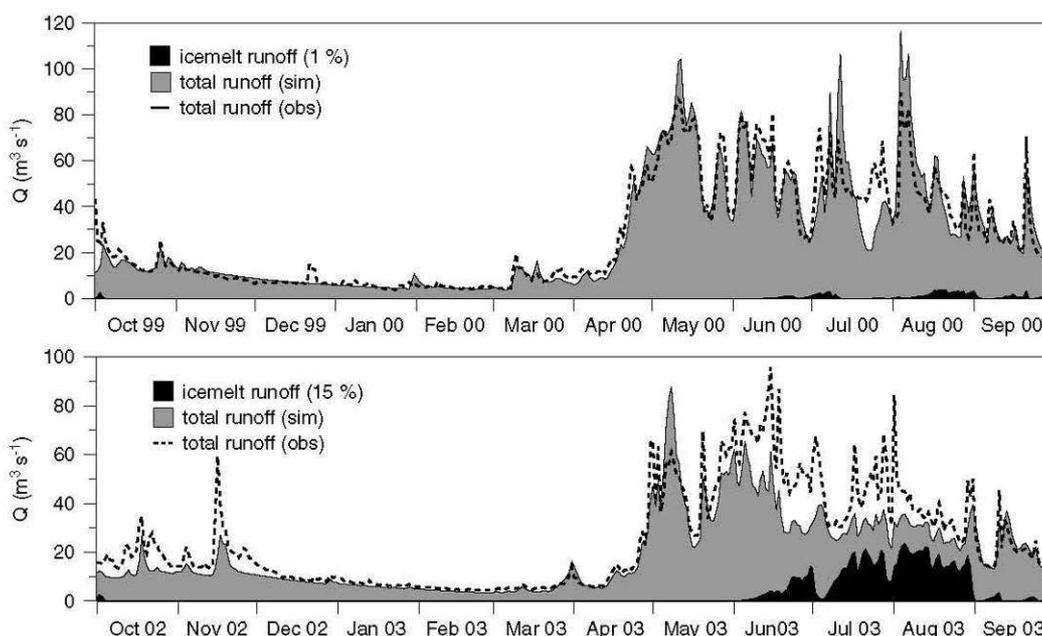


Figura 1.5. El área gris representa el caudal diario simulado para la estación Mittersill con la contribución de derretimiento (neviza/hielo) en negro y el caudal diario observado (línea segmentada) para los años 1999-2000 y 2002-2003.

La contribución de derretimiento glaciar relativa fue de aproximadamente 15%, lo que corresponde a una tasa de flujo de 148 mm a^{-1} . Transformando este valor de acuerdo a la superficie glaciar se obtuvo una pérdida de volumen específica de 2.677 mm a^{-1} .

1.4.7. Simulación del flujo del hielo y escorrentía de los glaciares de la cuenca del Río Yili, cadena Tien Shan, China noroccidental (Ye *et al.*, 2003)

Ye *et al.*, (2003) aplicaron un modelo de flujo de hielo basado en continuidad de masa para determinar el balance de masa de un glaciar frente a escenarios de cambio climático. Se seleccionaron 47 glaciares en la cuenca del río Yili, realizando un análisis estadístico de la distribución de áreas. El derretimiento se basó en un modelo grado-día. Como variables de entrada se utilizaron temperaturas medias mensuales y precipitación media mensual en el período 1954-1997 para la cuenca a diferentes altitudes. Se asumieron cambios climáticos de 1 K a^{-1} (cambio súbito) a $0,001 \text{ K a}^{-1}$ (cambio lento).

Se encontró que el modelo de flujo de hielo permite simular cambios en los glaciares en respuesta a cambios climáticos en función del tamaño del glaciar. A medida que aumenta el tamaño del glaciar se acelera la magnitud absoluta del retroceso, a pesar que los retrocesos relativos son normalmente modestos. En relación a parámetros como el largo del glaciar, su área y su volumen, éste

último sufre el mayor cambio frente a un calentamiento. En la muestra estudiada, se encontró que para glaciares grandes ($>0,6 \text{ km}^2$) el retroceso de su frente es más significativo que el cambio de su área, mientras que para glaciares pequeños lo opuesto se cumple. Bajo escenarios de cambio climático los glaciares pequeños con elevados valores máximos de escorrentía tienen tendencias a mostrar mayores cambios en escorrentía y asimismo a retroceder más que los glaciares mayores (en términos relativos). En síntesis encontraron que la respuesta al cambio climático es un aumento inicial de la escorrentía media anual, la que luego declina hasta valores muy por debajo de los iniciales, además encontraron que el momento en que se produce el máximo absoluto (así como la temporada de los máximos anuales) depende tanto del tamaño del glaciar como de la tasa de aumento de temperatura. Mientras mayor sea el ascenso de temperatura más pronto ocurrirán los caudales máximos los que tendrán también mayor magnitud.

1.5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN

La criósfera por naturaleza es dinámica y en el contexto de cambio climático actual se ha observado una reducción progresiva de las zonas glaciares y nivales. Sin embargo, la mayoría de los modelos hidrológicos aplicados a cuencas glaciares asumen que la geometría glaciar de superficie y la extensión glaciar son constantes en el tiempo tal como el modelo de Suárez (2007) y Suárez *et al.*, (2008) aplicado en la cuenca del Río Santa, Cordillera Blanca, Perú, presentado anteriormente.

El agua de fusión de origen glaciar es muchas veces la principal fuente que alimenta los valles de los Alpes durante la estación de verano. Lo mismo sucede en muchas otras cadenas montañosas del mundo, como en la Cordillera de los Andes de Chile y Argentina, por ejemplo. Por lo tanto, es de extrema importancia evaluar el impacto del cambio climático y del retroceso glaciar en los caudales de cauces de alta montaña.

El modelamiento de cuencas hidrológicas glaciares necesita considerar fenómenos de diferentes características. En una cuenca glaciar es necesario también considerar procesos propios de cuencas pluviales o nivales, cuya importancia dependerá del porcentaje de zonas glaciares y no glaciares que compongan la cuenca y el que variará ampliamente de acuerdo a cada zona de estudio.

Los resultados de la mayoría de los casos de estudio analizados constatan que una reducción de las superficies glaciares provoca inicialmente un aumento de los volúmenes de escurrimiento. Bajo escenarios de cambio climático del IPCC (2007), la mayoría de los modelos estudiados proyectan que los volúmenes de escurrimiento continuarán su aumento durante las próximas décadas para luego disminuir si la tendencia actual de aumento de temperatura continúa.

En el caso de Chile, el estudio de cambio climático para el siglo XXI (elaborado por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile a solicitud de la CONAMA, indica que el cambio de temperatura media del

escenario A2 respecto al clima actual sobre Chile continental variará entre 2° y 4°C (DGF, 2006).

Teniendo en consideración todo lo anterior es fundamental desarrollar un modelo hidrológico para cuencas con alto aporte glaciar en los Andes de Chile, y cuyas variables, parámetros y componentes, sean capaces de adaptarse a la diversidad glaciológica de las regiones en estudio. El modelo debe predecir asimismo cambios de superficie nival y glaciar que se podrían presentar en el futuro.

La selección del modelo hidrológico adecuado es una tarea compleja puesto que cada modelo representa las características (topografía, clima, etc.) específicas de una cuenca. Lo anterior implica que se debe conocer bien la zona de estudio y se deben disponer de los datos adecuados. Por último, la aplicación de un modelo hidrológico que ha sido concebido para una zona de estudio implica probablemente un trabajo de modificación y adaptación de la estructura del modelo si se desea aplicar en otra zona.

De los 7 ejemplos seleccionados de modelos hidrológicos de cuencas glaciares expuestos anteriormente, se observan diferentes ventajas y desventajas que se resumen en la Tabla 1.1.

En general y desde un punto de vista simplificado, en la mayoría de los modelos hidrológicos aquí presentados, el aporte glaciar al escurrimiento se aborda a través del modelo grado-día. Por su parte, la superficie no glaciar se aborda con otros tipos de modelos, incluyendo por ejemplo el GR2M. Los modelos más aplicados son de tipo semidistribuido y conceptual-global.

Debido a que un modelo constituye una representación abstracta no existe un modelo hidrológico perfecto, en todos los casos estudiados se privilegia un aspecto en desmedro de otro. El estudio realizado en Islandia por ejemplo privilegia el análisis glaciológico; aquel realizado para la cuenca de Salzach en Austria da mucha importancia al aporte nival y a los métodos de validación, mientras que en la cuenca del Río Santa en Perú se debieron asumir hipótesis poco realistas debido a la carencia de datos glaciológicos.

De todos los modelos hidrológicos de cuencas glaciares estudiados aquel realizado en la cuenca del valle de Zinal (Suiza) por Huss *et al.*, (2008) nos parece que es la alternativa más adecuada puesto que es del tipo semidistribuido con grillas a 25 m (por lo tanto menos complejo que un modelo distribuido), incluye el aporte y evolución glaciar, y requiere datos reales. En cuanto a los datos sería necesario realizar campañas de terreno para estimar el espesor del hielo y obtener la topografía del lecho rocoso. Para los datos hidrometeorológicos es fundamental contar con series de datos históricas que se podrían extraer de las zonas aledañas más cercanas a las cuencas de estudio. Inicialmente se podría aplicar el modelo a la cuenca donde exista la mayor cantidad de datos. Si no se cuenta con datos de espesor de hielo, que son escasos para los Andes chilenos, éstos se pueden estimar mediante consideraciones teóricas de flujo de hielo, como por ejemplo se realiza en el modelo de Ye *et al.*, (2003). La desventaja de este modelo es que solamente considera variaciones de escurrimiento a nivel anual y no estacional.

Tabla 1.1. Ventajas y desventajas de modelos hidrológicos de cuencas glaciares.

CUENCA	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Río Santa, Perú (Suarez, 2007; Suarez <i>et al.</i> , 2008)	Es un modelo de tipo global – conceptual simple que sólo requiere datos de caudal, precipitación y temperatura.	La contribución glaciar al escurrimiento es considerada como invariante a la escala anual y estacional. No se considera el aporte nival al escurrimiento.
Diversas cuencas de la Cordillera Blanca, Perú (Pouyaud <i>et al.</i> , 2005)	Modelo simple que requiere datos de caudal, precipitación y temperatura.	Se basa en la fuerte correlación entre la temperatura del aire de la alta atmósfera y el escurrimiento, válido para la Cordillera Blanca pero quizás no lo sea para otras zonas. Se debe mejorar el análisis de los procesos glaciares.
Cuenca de Llanganuco, Perú (Juen <i>et al.</i> , 2007)	Modelo basado principalmente en variables relacionadas con la humedad relativa, y que también utiliza temperatura atmosférica, desarrollado específicamente para latitudes tropicales.	No contempla consideraciones de flujo del hielo. El modelo no calcula evolución futura del área glaciar sino que se prescriben variaciones futuras basadas en el comportamiento histórico.
Valle Zinal, Suiza (Huss <i>et al.</i> , 2008)	Requiere datos simples para alcanzar una representación bastante completa de las diferentes partes de una cuenca glaciar. Se adapta bien a superficies complejas. La variación espacial de la acumulación es modelada tomando en cuenta los efectos de la redistribución de la nieve.	Se asumió que los parámetros de calibración son constantes en el tiempo; esta hipótesis tiene el potencial de causar errores en la predicción de la extensión glaciar futura y de escurrimiento. En cuanto a la parametrización del retroceso glaciar el método expuesto no permite reproducir escalas de tiempo para la transferencia de masa desde el área de acumulación hacia el área de ablación.
Hofsjökull y Vatnajökull Sur (Islandia) (Aðalgeirsdóttir <i>et al.</i> , 2006)	Representación detallada de la zona glaciar.	Se trata de un modelo mucho más glaciológico que requiere la aplicación de modelos complejos de flujo glaciar. Sólo cambios en el promedio anual de escurrimiento fueron considerados, sin tomar en cuenta cambios en las características de las variaciones estacionales, las que también pueden ser muy importantes.
Salzach Austria) (Koboltschnig <i>et al.</i> , 2008)	Considera variaciones de la cobertura de nieve, calculada con imágenes de satélite. Se aplicó un método de corrección a la superficie de nieve.	Se consideró una escala temporal de 1 hora, lo que es poco adecuado para los glaciares Universidad y Mocho debido a la precariedad de datos. La simulación de la acumulación de nieve durante el mes de invierno mostró debilidades debido a la falta de implementación en el modelo PREVAH de la redistribución de nieve por viento y avalanchas.
Río Yili, Tien Shan, China (Ye <i>et al.</i> , 2003)	Incluye el flujo del hielo, simulando adecuadamente el retroceso glaciar y su impacto en la escorrentía.	No considera variaciones estacionales, solamente variaciones anuales.

Independientemente del modelo seleccionado, a futuro se debería incluir también la evaporación (que se abordó en prácticamente todos los casos de estudio en forma empírica) puesto que como consecuencia del cambio climático el uso de suelo también se vería modificado con un aumento de las zonas de vegetación y, por lo tanto, con valores crecientes de evapotranspiración.

2. ANEXO: Modelamiento hidro-glaciológico de cuencas seleccionadas

A continuación se describe el modelo hidrológico aplicado a 3 cuencas localizadas en la zona norte (río Pulido, cuenca alta del río Copiapó), centro (glaciar Echaurren Norte, cuenca alta del río Maipo) y sur (glaciar Nef, cuenca alta del río Baker). En el presente informe se incluye la descripción del modelo utilizado y los resultados obtenidos para las 3 cuencas.

2.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL MODELO APLICADO

Como resultado de la investigación bibliográfica realizada en el presente estudio sobre la aplicación de modelos hidrológicos a diversas cuencas glaciares del mundo, se tomó la decisión de aplicar, como una primera aproximación, un modelo conceptual. Dicho modelo, se basa en el enfoque de reservorio lineal (Baker *et al.*, 1982) y fue aplicado por Schaeffli *et al.*, 2005 a cuencas alpinas en Suiza y por Suarez *et al.*, 2008 en la cuenca alta del río Santa, Cordillera Blanca, Perú. Para su aplicación se utilizarán como datos de entrada: temperatura, precipitación y evapotranspiración potencial a resolución mensual. El dato de salida corresponde al caudal, expresado como caudal específico en unidades de mm/mes. Desde el punto de vista espacial, la cuenca se divide en zona glaciar y no glaciar. Considerando la variación espacial de las variables de entrada, la cuenca se divide igualmente en rangos de elevación. El escurrimiento proveniente de la zona glaciar se representa a través de dos reservorios lineales correspondiente a la nieve y el hielo según las Ecuaciones 2.1 y 2.2, respectivamente. Sobre el área de nieve es válida la Ecuación 2.1:

$$Q_{Nieve}(t_{i+1}) = Q_{Nieve}(t_i) \times e^{-(t_{i+1}-t_i) \times K_{Nieve}} + [P_{liq,Nieve}(t_{i+1}) + M_{Nieve}(t_{i+1})] \times (1 - e^{-(t_{i+1}-t_i) \times K_{Nieve}}) \quad (\text{Ecuación 2.1})$$

Donde:

$Q_{Nieve}(t_{i+1})$: escurrimiento proveniente de la nieve para el mes siguiente a t_i (mm); $Q_{Nieve}(t_i)$: escurrimiento proveniente de la nieve en el mes t_i (mm); K_{Nieve} : constante de tiempo del reservorio; $P_{liq,Nieve}(t_{i+1})$ precipitación líquida caída sobre la superficie de nieve para el mes siguiente a t_i (mm); $M_{Nieve}(t_{i+1})$: derretimiento de nieve para el mes siguiente a t_i (mm).

Para el cálculo del reservorio hielo, se aplica la misma ecuación sobre el área de hielo:

$$Q_{Hielo}(t_{i+1}) = Q_{Hielo}(t_i) \times e^{-(t_{i+1}-t_i) \times K_{Hielo}} + [P_{liq,Hielo}(t_{i+1}) + M_{Hielo}(t_{i+1})] \times (1 - e^{-(t_{i+1}-t_i) \times K_{Hielo}}) \quad (\text{Ecuación 2.2})$$

Donde:

$Q_{Hielo}(t_{i+1})$: escurrimiento proveniente del hielo para el mes siguiente a t_i (mm); $Q_{Hielo}(t_i)$: escurrimiento proveniente del hielo en el mes t_i (mm); K_{Hielo} : constante

de tiempo del reservorio; $P_{liq,Hielo}(t_{i+1})$ precipitación líquida caída sobre la superficie de hielo para el mes siguiente a t_i (mm); $M_{Hielo}(t_{i+1})$: derretimiento de hielo para el mes siguiente a t_i (mm).

El escurrimiento proveniente de la zona no glaciar se representa a través del cálculo del caudal de base (que considera el escurrimiento proveniente de la nieve y de la precipitación líquida así como la evapotranspiración potencial) (Ecuación 2.3) y del caudal rápido (Q_{rapido}) que para el caso de la presente investigación será considerado igual a la precipitación efectiva ($P_{efectiva}$) (Ecuación 2.4) debido a que se toma en cuenta una resolución mensual.

$$Q_{Base} = K_{Lento} \times S_{Lento} \times S \quad (\text{Ecuación 2.3})$$

$$Q_{Rapido} = P_{efectiva} \quad (\text{Ecuación 2.4})$$

Donde:

Q_{Base} : Caudal base (m^3/s); K_{Lento} : tiempo de vaciamiento; S_{Lento} : almacenamiento actual (mm); S : superficie de la cuenca (m^2).

Para cada unidad espacial definida por los rangos de altitud, se resuelve la ecuación que corresponda según se trate de la zona glaciar o no glaciar. El escurrimiento total de la cuenca corresponde a la suma del escurrimiento obtenido para todas las superficies correspondientes a todos los rangos (bandas) de elevación (b) (Ecuación 2.5):

$$Q_{total} = \frac{1}{a_c} \sum_{i=1}^2 \sum_{b=1}^{n_i} a_{i,b} \times Q_{i,b} \quad (\text{Ecuación 2.5})$$

Donde:

i : es un índice para cada una de las dos zonas de la cuenca ($i = 1$ para la cuenca glaciar, $i = 2$ para la cuenca no glaciar); b : es un índice para cada una de las bandas de elevación en la parte i ; $a_{i,b}$ (km^2): área de cada banda de elevación b que pertenece a la subcuenca i ; $Q_{i,b}$ (mm/mes): caudal específico de la banda altitudinal; a_c (km^2): es el área total de la cuenca.

Expresada de otra forma, la Ecuación 2.5 es equivalente a la sumatoria de los cuatro tipos de escurrimiento descritos arriba:

$$Q_{total} = Q_{nieve} + Q_{hielo} + Q_{Base} + Q_{Rapido} \quad (\text{Ecuación 2.6})$$

A continuación se presenta una modelación glacio-hidrológica de las cuencas glaciares del río Pulido (afluente del río Copiapó, Región de Atacama); Echaurren Norte (río Maipo, Región Metropolitana); y Nef (río Baker, Región de Aysén). En este informe se describe el modelo hidrológico aplicado y se comparan los caudales simulados con los caudales observados en la estación hidrológica respectiva a la salida de la cuenca glaciar. Asimismo se realiza una proyección de los recursos hídricos para fines de este siglo considerando escenarios de cambio climático futuro.

2.2. MODELAMIENTO EN LA CUENCA DEL GLACIAR ECHAURREN

El glaciar Echaurren Norte es un pequeño ($0,46 \text{ km}^2$) glaciar de montaña ubicado en la cuenca alta del río Yeso, Cajón del Maipo, Región Metropolitana, coordenadas medias $33^{\circ}35'S$, $70^{\circ}08'W$ (Figura 2.1). Se le denomina Echaurren Norte puesto que aproximadamente 1 km hacia el sur se ubica el glaciar Echaurren Sur. La orientación del glaciar Echaurren Norte es sur-oriental, lo que resulta en relativamente baja radiación solar y favorece la preservación del hielo. El rango altitudinal del glaciar es de 3.600-3.950 m, con una cota promedio de 3.830 m s.n.m. A una altitud de 3.000 m la DGA estableció en 1975 una estación fluviométrica que controla una cuenca de $3,98 \text{ km}^2$ que incluye al glaciar Echaurren Norte. Vale decir, la proporción de área glaciar es del 11,6%. El área no glaciar (88,4% restante) tiene un régimen principalmente nival.

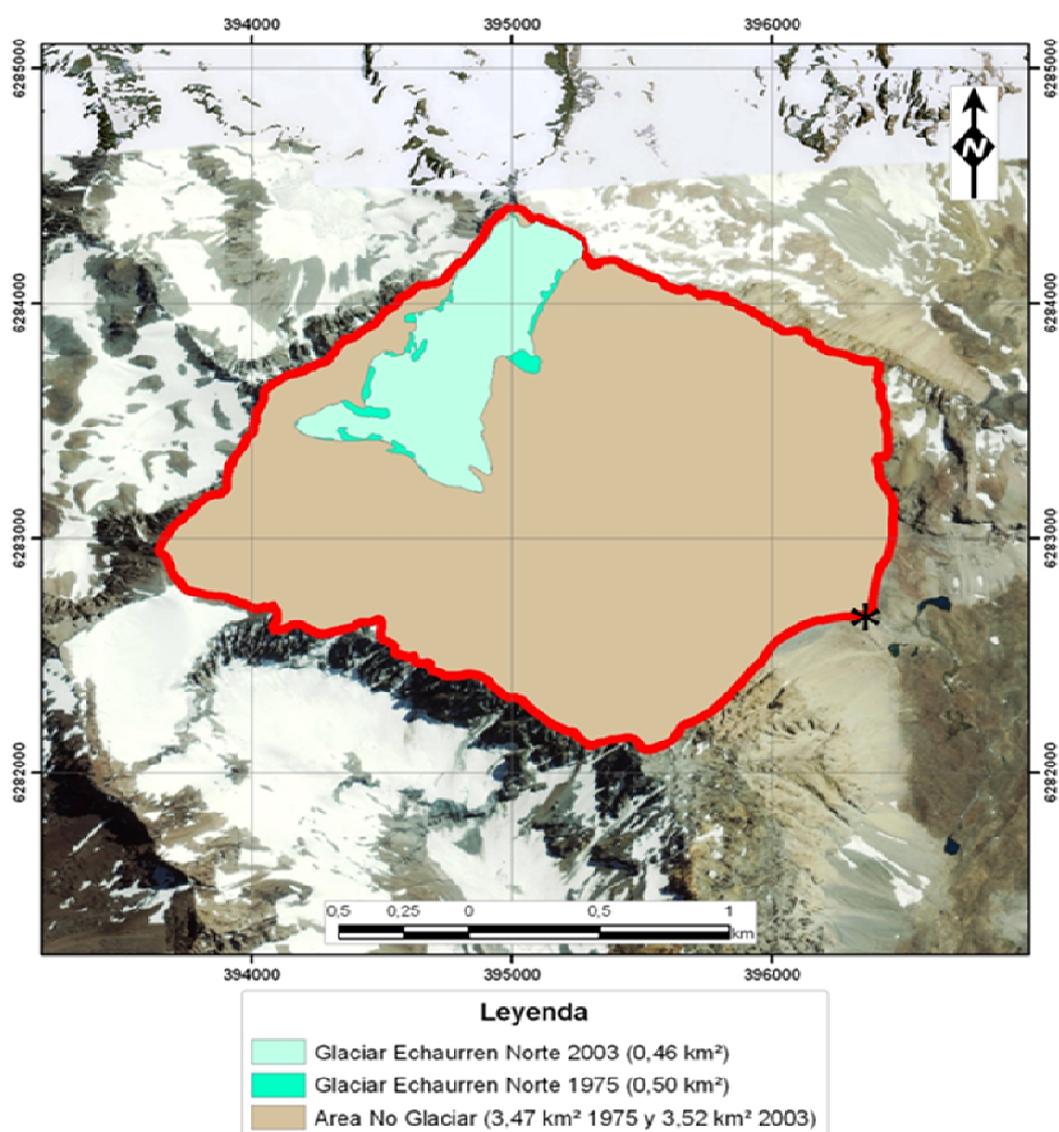


Figura 2.1. Glaciar Echaurren Norte y cuenca asociada. Proyección UTM (zona 19) y Datum WGS 1984. El asterisco indica la posición de la estación fluviométrica, ubicada a la salida de la cuenca.

2.2.1. Datos disponibles

2.2.1.1. Sistema de Información Geográfica (SIG)

Se compiló un Sistema de Información Geográfica (SIG) basado en la siguiente información:

- Imagen satelital QuickBird del 8 Febrero 2003 (fuente Google Earth), ortorectificada por Google Earth según el modelo digital de elevación SRTM de 2000, utilizada para el cálculo de áreas y el trazado de la divisoria de cuencas (Figura 2.1).
- Mapa topográfico del año 1975 (DGA, 1975) confeccionado en terreno por la DGA a partir de un levantamiento taquimétrico.
- Modelo Digital de Elevación (MDE) SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) de Febrero del año 2000, utilizado para trazar la divisoria de cuencas, para el cálculo de curvas de nivel y para el cálculo de la hipsometría (Figura 2.2). El MDE SRTM tiene una resolución horizontal de 90*90 m y una precisión vertical de aproximadamente 9 m (Farr *et al.*, 2007).

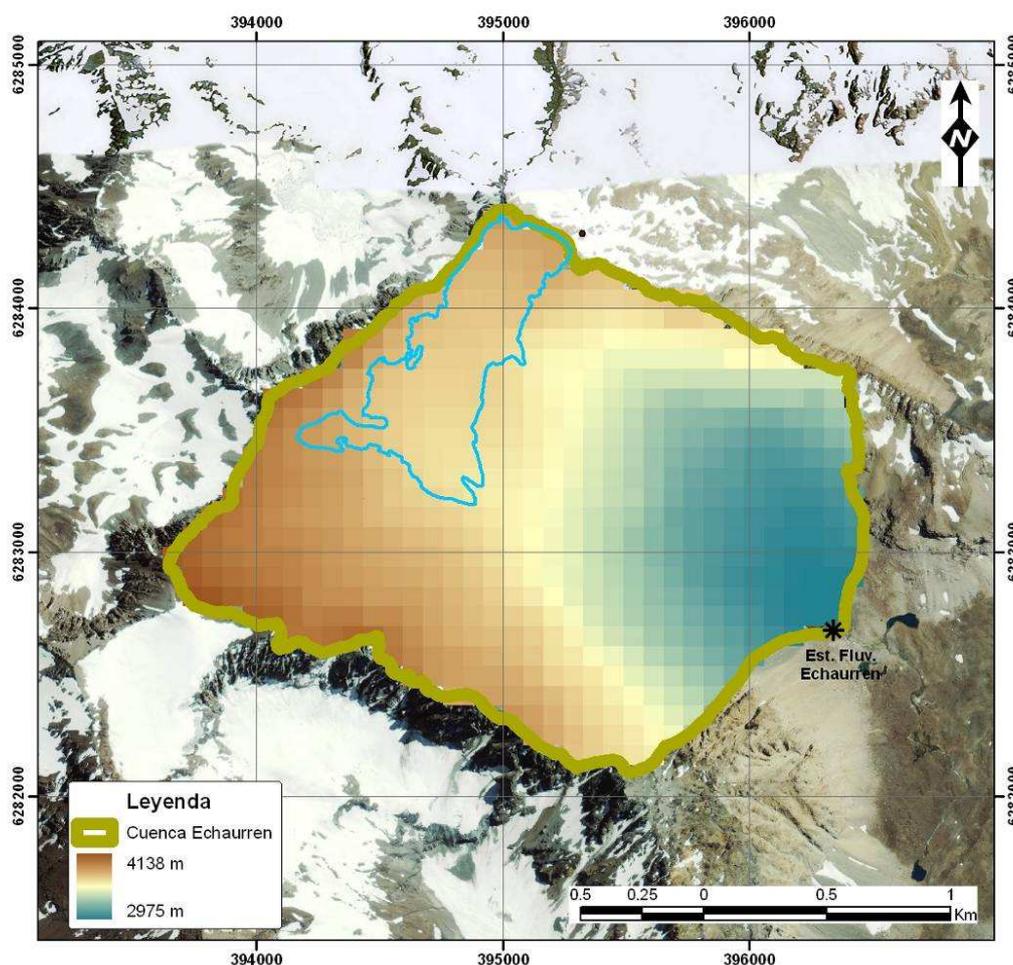


Figura 2.2. Modelo Digital de Elevación SRTM de la cuenca Echaurren. El mapa de elevación está representado en la proyección UTM (zona 19) y el Datum WGS 1984.

Utilizando la información compilada en el SIG se procedió a calcular los cambios de superficie del glaciar, las curvas de nivel, y la hipsometría.

- Cambios en la superficie del glaciar

La carta topográfica del año 1975 y la imagen satelital QuickBird de 2003 fueron utilizadas para estimar variaciones de superficie del glaciar. Se estima que entre los años 1975 y 2003 el glaciar Echaurren perdió 0,04 km² (Figura 2.1).

- Curvas de nivel

Se calcularon curvas de nivel a una equidistancia de 50 m utilizando el MDE SRTM. La equidistancia se seleccionó en función del tamaño reducido del área glaciar.

- Hipsometría

Con el fin de analizar la distribución de la superficie según la elevación, se dividió la cuenca de acuerdo a rangos altitudinales de 50 m (Figura 2.3) en base a las curvas de nivel obtenidas con el modelo SRTM.

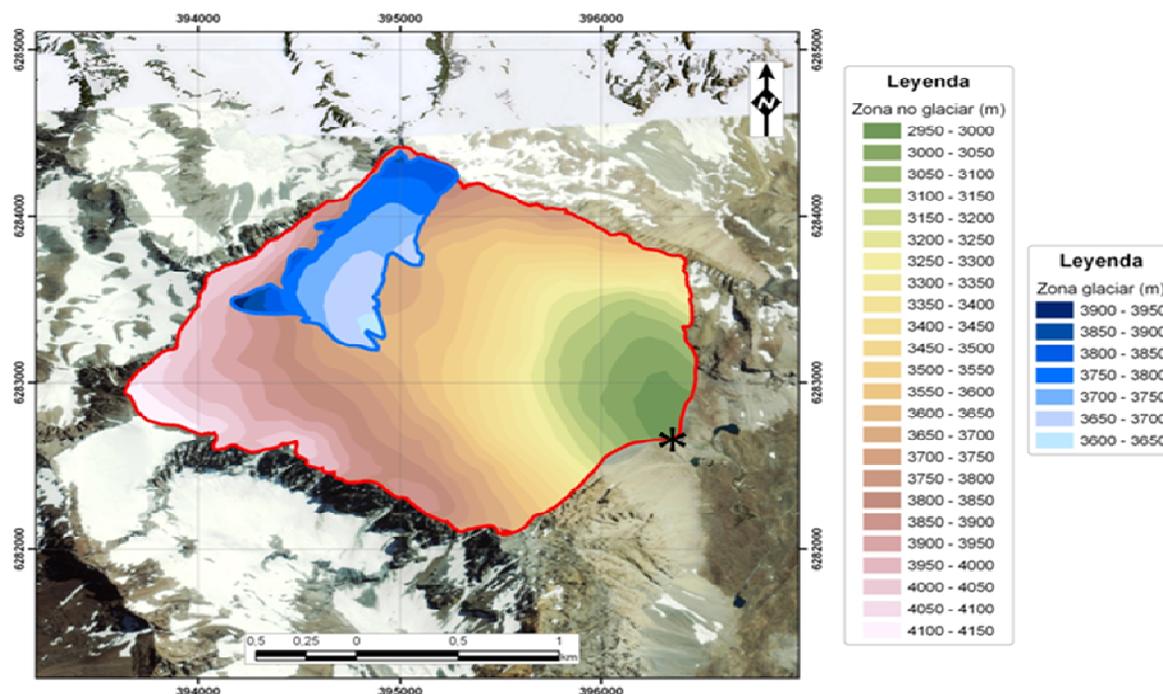


Figura 2.3. Bandas altitudinales cada 50 m para la cuenca Echaurren Norte. Proyección cartográfica UTM (zona 19) y Datum WGS 1984. El asterisco indica la posición de la estación fluviométrica, ubicada a la salida de la cuenca.

2.2.1.2. Datos hidro-meteorológicos

Los datos hidro-meteorológicos disponibles se resumen en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Datos hidro-meteorológicos disponibles.

Estación	UTM X	UTM Y	Elev. (m)	Temp.	Precip.	Caudal
El Yeso	399083	6273104	2.475	1962-2009	1962 – 2009	
La Obra	360850	6281450	820		1950 - 2000	
Quinta Normal	343585	6298130	520		1866 - 2001	
Fluviométrica Estero Glaciar Echaurren	396423	6283273	3.000			1976-2004

La precipitación sólida se estima considerando un umbral de temperatura de 0 °C, de acuerdo a la siguiente relación:

$$\begin{aligned} \text{Para } T \leq 0^{\circ}\text{C}, P_{\text{Nieve}} &= P_{\text{Total}}, P_{\text{Líquida}} = 0 \\ \text{Para } T > 0^{\circ}\text{C}, P_{\text{Nieve}} &= 0, P_{\text{Líquida}} = P_{\text{Total}} \end{aligned}$$

Donde:

P_{Total} (mm/d): precipitación total registrada en la estación meteorológica

P_{Nieve} (mm/d): precipitación sólida

$P_{\text{Líquida}}$ (mm/d): precipitación líquida

T (°C): temperatura del aire.

Junto con los datos meteorológicos se tomaron en consideración los datos de balance de masa (invernal y estival) del glaciar Echaurren Norte, medido desde 1975 por la Dirección General de Aguas. Los datos de ablación estival obtenidos del balance de masa fueron utilizados para la validación de la aplicación del modelo grado-día. Los datos de acumulación invernal fueron utilizados para el cálculo del gradiente de precipitación y se consideraron como representativos de la precipitación caída en la parte alta de la cuenca.

Dado que el rango altitudinal del glaciar Echaurren Norte es muy pequeño (350 m: 3.600-3.950 m), durante los años con balance de masa positivo la DGA ha observado que usualmente la línea de equilibrio desciende por debajo de la cota mínima del glaciar (3.600 m), lo que significa que todo el glaciar se transforma en zona de acumulación. Por otra parte, durante los años con balance negativo, se ha observado que la línea de equilibrio asciende por sobre la cota máxima del glaciar (3.950 m). Esto tendrá relevancia para los factores de grado-día utilizados en el modelo de ablación según se describe más adelante.

2.2.2. Aspectos generales para la aplicación del modelo a la cuenca Echaurren

Como se mencionó anteriormente, la cuenca de estudio de 3,98 km² incluye el Glaciar Echaurren (0,46 km² en 2003) que corresponde al 11,6% del área total de la cuenca. De esta forma, al interior de la zona de estudio se producen diferentes procesos según se trate de la zona glaciar o la zona no glaciar. Es por ello que la cuenca fue dividida en zona glaciar y no glaciar con el fin de calcular sus aportes correspondientes en forma independiente.

Se asume que las variables climáticas que intervienen en la simulación del caudal (temperatura y precipitación) varían principalmente en función de la elevación, por lo que la cuenca se dividió en rangos de elevación de 50 m. Para cada rango y para cada una de las dos áreas (glaciar y no glaciar) que componen la cuenca se calculó el caudal simulado a nivel mensual.

2.2.2.1. Gradiente de temperatura

El gradiente altitudinal de temperatura se consideró igual al valor planetario habitual de 6,5°C/km en la atmósfera libre (René Garreaud, Departamento de Geofísica, Universidad de Chile, comunicación personal), que es un promedio entre el gradiente adiabático seco y el gradiente adiabático húmedo. Tomando como valor inicial la temperatura a nivel mensual observada en la estación El Yeso ubicada 11 km al SSE del glaciar Echaurren Norte, a una elevación de 2.475 m, se calculó la temperatura para cada rango de elevación en la cuenca del glaciar Echaurren Norte.

2.2.2.2. Gradiente de precipitación

Contrariamente a la temperatura, la precipitación presenta por lo general una variación espacial importante. En consecuencia el cálculo de la variación espacial y altitudinal de la precipitación es mucho más complejo, sobre todo si no se dispone de una adecuada red de observación de la precipitación bien distribuida al interior de la cuenca.

Como un supuesto inicial, se asumió que los datos de balance de masa invernal (abril a septiembre) reflejan la precipitación invernal en la zona. Dicha precipitación invernal se utilizó para calcular el gradiente altitudinal de precipitación con las estaciones del valle del río Maipo. Para ello se consideraron las estaciones Quinta Normal, El Yeso, La Obra, cuyas precipitaciones invernales se compararon con los valores de acumulación invernal en el glaciar Echaurren Norte.

A pesar que en invierno la acumulación en el glaciar Echaurren Norte y la precipitación en El Yeso tienen por sí solos una muy buena correlación a nivel anual, se observó que los valores invernales registrados en la estación El Yeso están muy por debajo de la relación observada entre Quinta Normal, La Obra y la acumulación invernal del glaciar (Figura 2.4). Ello probablemente se debe a que en El Yeso una proporción importante de la precipitación ocurre en forma sólida (nieve), que no queda registrada como precipitación debido a una

limitante instrumental. En consecuencia, se prefirió asumir que los datos de precipitación de la estación El Yeso corresponden solamente a precipitación líquida y por lo tanto fueron descartados.

Una vez descartada la estación El Yeso, se puede considerar que la estación más cercana al glaciar Echaurren Norte es la estación La Obra. Se calculó un coeficiente de determinación de $R^2=0,84$ entre los valores de acumulación invernal del Glaciar Echaurren entre 1976/77 – 2000/01 y la precipitación acumulada en invierno durante el mismo período registrada en la estación La Obra (Figura 2.5).

Para el cálculo del gradiente de precipitación se estableció una relación lineal entre la acumulación invernal promedio del periodo 1976/77 – 2000/01 medida en el glaciar Echaurren Norte (2.605 mm equivalente en agua) y el promedio de precipitación invernal (abril a septiembre) para el mismo período registrado en La Obra (601,5 mm), obteniendo un valor de precipitación invernal 4,33 veces más alto en el glaciar Echaurren Norte que en La Obra. Para el período estival (octubre a marzo), y ante la ausencia de datos de precipitación en la cuenca del glaciar Echaurren Norte, se consideró que el gradiente altitudinal es igual al gradiente altitudinal durante el invierno. Posteriormente dicho gradiente fue aplicado a los datos mensuales de la estación La Obra y de esta manera se obtuvo el valor de precipitación mensual para cada rango de elevación en la cuenca del glaciar Echaurren Norte de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$P(b) = FAP(b) \times P_{REF} \times F_M \quad (\text{Ecuación 2.7})$$

Con

$$FAP(b) = FAP_M + \frac{1}{\Delta H} \times ((FAP_M - 1) \times H(b) - FAP_M \times H_{MAX} + H_{MAX})$$

(Ecuación 2.8)

Donde:

$P(b)$ es la precipitación para una determinada banda altitudinal de altura $H(b)$; P_{REF} es la precipitación en la estación meteorológica escogida como referencia (La Obra en este caso); F_M es un factor multiplicativo tal que $F_M=0$ si $P_{LO}=0$ y $F_M=1$ si $P_{LO} \neq 0$ para un mes determinado; FAP_M es el factor de amplificación de la precipitación entre la cota máxima de la cuenca y la estación de referencia (4,33 en el caso del glaciar Echaurren Norte respecto de La Obra); $FAP(b)$ es el factor de amplificación de la precipitación entre la cota de la banda altitudinal $H(b)$ y la estación de referencia (4,33 para el glaciar Echaurren Norte ubicado a una altitud de 3.830 m, y 3,41 para la estación fluviométrica Echaurren ubicada a una altitud de 3.000 m por ejemplo); ΔH es la diferencia de altura entre la estación de referencia (La Obra, 820 m) y la altura máxima de la cuenca, H_{MAX} (3.830 m en este caso, que corresponde a la altura media del glaciar Echaurren Norte), vale decir 3.010 m.

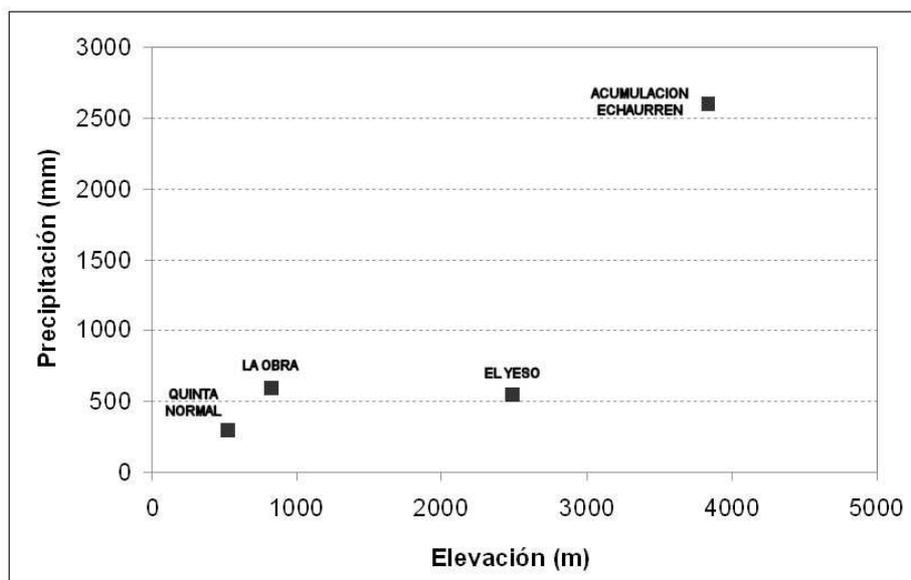


Figura 2.4. Precipitación invernal (Abril a Septiembre) promedio para el periodo 1976-2001, en función de la elevación para distintas estaciones en la cuenca del río Maipo. “Acumulación Echaurren” representa la acumulación invernal del glaciar Echaurren a partir de datos de balance de masa promedio registrado en el glaciar Echaurren en el período 1976-2001 (DGA, comunicación personal).

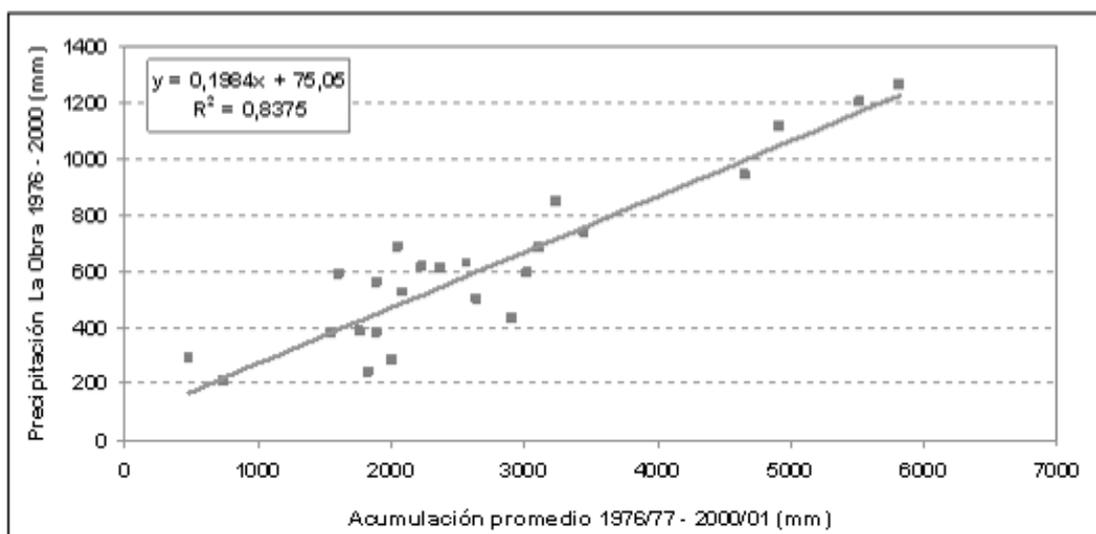


Figura 2.5. Relación entre la precipitación invernal en La Obra y la acumulación invernal en el glaciar Echaurren Norte en el período 1976-2001.

2.2.3. Procesamiento de la zona glaciar

2.2.3.1. Posición de la línea de equilibrio del glaciar

Al interior del área glaciar puede existir una superficie de hielo o de nieve. Para el cálculo del aporte al escurrimiento de la zona glaciar se tomó en cuenta la posición de la línea de equilibrio según se explicó anteriormente, vale decir, para los años de balance de masa positivo la línea de equilibrio se asumió que se ubica en la parte baja del glaciar (3.600 m). Al contrario para los años con

balance de masa negativo, la línea de equilibrio se asumió ubicada en la parte alta del glaciar (3.950 m).

2.2.3.2. Variación del volumen de hielo y de la superficie glaciar

Teniendo en cuenta el contexto de cambio climático actual es fundamental considerar que los glaciares disminuyen de volumen y de superficie frente a escenarios de aumento de temperatura. También es necesario considerar escenarios de variación de precipitación que pueden acelerar el retroceso/adelgazamiento de los glaciares en el caso de condiciones más secas, o bien aumento de glaciares en el caso de condiciones más húmedas.

Los datos disponibles de superficie del glaciar Echaurren Norte corresponden a una imagen satelital Quickbird del año 2003, que indica un área glaciar de 0,46 km², y la superficie estimada a partir de un mapa topográfico del año 1975, de 0,50 km² (DGA, 1975).

La variación del volumen de hielo (VH) y de la superficie glaciar (SH) se parametrizó de la siguiente manera. Se consideró que el glaciar tiene un espesor (profundidad) constante en toda su superficie (E), de modo que el volumen de hielo perdido/aportado por mes para cada banda altitudinal es:

$$VH(b,t) = \frac{a_{iT}(b,t) \times Q(b,t)_{hielo}}{1000} \quad (\text{Ecuación 2.9})$$

Donde:

$a_{iT}(b,t)$ es la superficie total de hielo en la banda altitudinal b de la cuenca en el mes t y $Q_{hielo}(t)$ es la escorrentía proveniente de todos los cuerpos de hielo en la banda altitudinal b de la cuenca en el mes t , de acuerdo a la Ecuación 2.2. $VH(b,t)$ tiene unidades de m³/mes. Si en un mes determinado la ablación es superior a la acumulación habrá disminución de volumen glaciar en la banda altitudinal respectiva. Si por el contrario en un año determinado la acumulación es superior a la ablación habrá aumento de volumen glaciar en dicha banda. En el modelo se considera que la pérdida de volumen resulta en una pérdida de superficie dada por:

$$Sg(b,i+1) = Sg(b,i) * (1 - (Q_{Hielo}(b,i)/1000) / \text{Espesor}) \quad (\text{Ecuación 2.10})$$

Donde:

i : índice de tiempo (mes); b : índice de banda; Sg : superficie glaciar (m²); Q_{Hielo} : caudal proveniente del reservorio de hielo (mm/mes); Espesor : estimación del espesor medio del glaciar (m).

La superficie inicial (enero 2009) del glaciar Echaurren Norte se considera igual a 0,46 km². El espesor promedio inicial (enero 2010) del glaciar Echaurren Norte se considera que es igual a 26 m ± 5 m (Puig y Valdivia, 1977) menos el balance de masa acumulado neto de -7,92 m entre 1974 y 2009 (DGA, comunicación personal), por lo que aproximamos el espesor a 20 m.

En el punto 2.2.5.2. del presente informe se describe el cálculo del caudal de la cuenca frente a escenarios futuros de cambio climático.

2.2.3.3. Derretimiento potencial de nieve y hielo

El derretimiento potencial de nieve $M_{p,Nieve}$ y de hielo $M_{p,Hielo}$ se calcula según el método simplificado de grado-día (Hock, 2003), basado en una dependencia lineal de la sumatoria de las temperaturas positivas (sobre 0°C) a nivel diario. Se asume que el umbral de temperatura para derretimiento es igual a 0°C, vale decir, se asume que temperaturas negativas no contribuyen al derretimiento. Considerando que en el presente estudio se tomó en cuenta una resolución mensual, los coeficientes grado-día fueron multiplicados por el número de días correspondientes a cada mes, obteniendo de esta manera un valor mensual para las áreas con hielo o nieve definidas por las bandas de elevación, la ELA y la estimación de la precipitación sólida descrita en el punto 2.2.1.2.

El derretimiento potencial de la nieve se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$M_{p,Nieve} = A_{Nieve} \times T^{\circ C^+} \text{ (Ecuación 2.11)}$$

Donde:

$M_{p,Nieve}$: derretimiento potencial de nieve (mm); A_{Nieve} : factor grado-día; $T^{\circ C^+}$: sumatoria de grados positivos de temperatura durante el mes.

El derretimiento potencial de hielo es:

$$M_{p,Hielo} = A_{Hielo} \times T^{\circ C^+} \text{ (Ecuación 2.12)}$$

Donde:

$M_{p,Hielo}$: derretimiento potencial de hielo (mm); A_{Hielo} : factor grado-día; $T^{\circ C^+}$: sumatoria de grados positivos de temperatura.

2.2.3.3.1. Coeficientes grado-día para la nieve y el hielo

Los factores grado-día A_{Nieve} y A_{Hielo} corresponden a coeficientes lineales para el derretimiento de nieve y hielo (mm/d/°C), respectivamente.

Para un mismo lugar los factores grado-día no son constantes en el tiempo, sino que varían de acuerdo a la evolución de la superficie (albedo, compactación, etc.). También existen variaciones geográficas relevantes de los factores grado-día. Para la cuenca del glaciar Echaurren Norte no se dispone de una estimación de referencia *in situ*, por lo cual se obtuvieron los factores grado-día a partir de la literatura. La Tabla 2.2 ilustra factores grado-día obtenidos en Patagonia e Himalaya y los factores adoptados para la cuenca del glaciar Echaurren Norte. En la Tabla 2.2, hielo y nieve limpia indican ausencia de detritos (material particulado) sobre la superficie del glaciar, mientras que hielo y nieve sucia indican presencia de una capa muy delgada de material

particulado sobre la superficie del glaciar, lo que ha sido observado en el glaciar Echaurren Norte hacia mediados del verano. Por este motivo se considera en la modelación que hasta el 30 de septiembre existe nieve y hielo limpio en la cuenca, mientras que a partir del 1 de octubre y hasta el 30 de abril se considera que existe hielo sucio en la cuenca.

Tabla 2.2. Factores grado-día obtenidos en Himalaya y Patagonia, y valores promedio adoptados en forma preliminar para la cuenca del glaciar Echaurren.

	Anieve	Ahielo	Latitud	Elevación	Período	Referencia
REGION	mm d-1 °C-1	mm d-1 °C-1		m s.n.m.		
Himalaya						
Glaciar Dokriani	5,9		31°45' N	4000	4 Jun-6 Jun 1995	Singh and Kumar, 1996
Glaciar Dokriani (hielo y nieve limpia)	5,8	7,4	31°45' N	4000	4 días (1997-98)	Singh <i>et al.</i> , 2000a,b
Glaciar Dokriani (hielo y nieve sucia)	6,4	8,1	31°45' N	4000	4 días (1997-98)	Singh <i>et al.</i> , 2000a,b
Patagonia						
Glaciar Moreno (Campo de Hielo Patagónico Sur)		7,1	50°28' S	330	12 Nov 1993-1 Mar 94	Takeuchi <i>et al.</i> , 1996
Glaciar Pío XI (Campo de Hielo Patagónico Sur)		7,3	49°10' S	100	24-25 Nov 1996	Casassa and Rivera, 1999
Glaciar Lengua (Gran Campo Nevado)		7,6	52°49' S	340	22 Feb-13 Abr 2000	Schneider <i>et al.</i> , 2007
Valores adoptados para el glaciar Echaurren						
Nieve y hielo limpio	5,9	7,4				Promedio de Patagonia y
Nieve y hielo sucio	6,4	8,1				Glaciar Dokriani, Himalaya

2.2.3.4. Reservorio nieve

El reservorio nieve se calcula como sigue:

$$Q_{Nieve}(t_{i+1}) = Q_{Nieve}(t_i) \times e^{-(t_{i+1}-t_i) \times k_{Nieve}} + [P_{liq,Nieve}(t_{i+1}) + M_{Nieve}(t_{i+1})] \times (1 - e^{-(t_{i+1}-t_i) \times k_{Nieve}}) \quad (\text{Ecuación 2.13})$$

Donde:

$Q_{Nieve}(t_{i+1})$: escurrimiento proveniente de la nieve para el mes siguiente a t_i (mm); $Q_{Nieve}(t_i)$: escurrimiento proveniente de la nieve en t_i (mm); K_{Nieve} : constante de tiempo del reservorio; $P_{liq,Nieve}(t_{i+1})$ precipitación líquida caída sobre la superficie de nieve para el mes siguiente a t_i (mm); $M_{Nieve}(t_{i+1})$: derretimiento de nieve para el mes siguiente a t_i (mm).

El primer paso corresponde a calcular el derretimiento potencial $M_{p,Nieve}$ con el modelo grado-día.

$$M_{p,Nieve} = A_{Nieve} \times T^{\circ C^+} \quad (\text{Ecuación 2.14})$$

Donde:

$M_{p,Nieve}$: derretimiento potencial de nieve (mm); A_{Nieve} : factor grado-día; $T^{\circ C^+}$: sumatoria de grados positivos de temperatura.

El derretimiento potencial de nieve depende de la altura de nieve H (mm). Es por ello que sobre la base del derretimiento potencial de la nieve se debe calcular el derretimiento real M_{Nieve} .

En el caso que:

$$H_s^1 + P_{Nieve} - M_{p,Nieve} \geq 0 \text{ entonces,}$$

$$M_{Nieve} = M_{p,Nieve}$$

(Ecuación 2.15)

Donde:

H_s^1 : altura de la nieve en el mes 1 (mm); P_{Nieve} : precipitación de sólida (mm); $M_{p,Nieve}$: derretimiento potencial de la nieve (mm); M_{Nieve} : derretimiento real de nieve (mm).

Por el contrario, si,

$$H_s^1 + P_{Nieve} - M_{p,Nieve} < 0 \text{ entonces,}$$

$$M_{Nieve} = H_s^1 + P_{Nieve} \text{ (Ecuación 2.16)}$$

En ambos casos para definir el estado de H_s^1 para el intervalo siguiente (H_s^2):

$$H_s^2 = H_s^1 + P_{Nieve} - M_{Nieve} \text{ (Ecuación 2.17)}$$

2.2.3.5. Reservorio Hielo

El reservorio hielo se calcula como:

$$Q_{Hielo}(t_{i+1}) = Q_{Hielo}(t_i) \times e^{-(t_{i+1}-t_i) \times k_{Hielo}} + [P_{liq,Hielo}(t_{i+1}) + M_{Hielo}(t_{i+1})] \times (1 - e^{-(t_{i+1}-t_i) \times k_{Hielo}}) \text{ (Ecuación 2.18)}$$

Donde:

$Q_{Hielo}(t_{i+1})$: escurrimiento proveniente del hielo para el mes siguiente a t_i (mm); $Q_{Hielo}(t_i)$: escurrimiento proveniente del hielo en el mes t_i (mm); K_{Hielo} : constante de tiempo del reservorio; $P_{liq,Hielo}(t_{i+1})$ precipitación líquida caída sobre la superficie de hielo para el mes siguiente a t_i (mm); $M_{Hielo}(t_{i+1})$: derretimiento de hielo para el mes siguiente a t_i (mm).

El derretimiento de hielo M_{Hielo} se calcula de la siguiente manera:

$$M_{p,Hielo} = A_{Hielo} \times T^{\circ C^+} \text{ (Ecuación 2.19)}$$

Donde:

$M_{p,Hielo}$: derretimiento potencial de hielo (mm); A_{Hielo} : factor grado-día; $T^{\circ C^+}$: grados positivos de temperatura.

Para el caso del hielo se considera como hipótesis que el reservorio es infinito, por lo tanto:

$$M_{Hielo} = M_{p,Hielo} \quad (\text{Ecuación 2.20})$$

Donde:

M_{Hielo} : derretimiento de hielo real (mm); $M_{p,Hielo}$: derretimiento de hielo potencial (mm). Tal como se indicó en 2.4.1.2, para la proyección futura de recursos hídricos, el reservorio de hielo no es infinito, sino que tiene un espesor inicial que aumenta/disminuye mes a mes dependiendo de la acumulación/ablación. En el caso que el espesor del hielo alcance valor cero, la superficie de hielo desaparece y se transforma en cuenca no glaciar.

2.2.4. Procesamiento de la zona no glaciar

De manera general, en la zona no glaciar la precipitación caída (precipitación equivalente) puede transformarse en escurrimiento a través de dos procesos: (i) uno lento que toma en cuenta la capacidad de almacenamiento del suelo, los procesos de infiltración y el caudal de base asociado (ii); y otro rápido que considera el aporte directo de la precipitación al escurrimiento. En el contexto del presente estudio, los procesos de transformación de precipitación bruta a escurrimiento se representan a través del Caudal Base (Q_{Base}) y del Reservorio Rápido (Q_{Rapido}).

El Reservorio Rápido está vinculado al reservorio lento puesto que la precipitación disponible para el escurrimiento dependerá de la infiltración y el estado de saturación del suelo.

El aporte nival se incluye en el cálculo de precipitación equivalente.

2.2.4.1. Caudal Base

A pesar de que los datos proporcionados por la DGA son de caudales mensuales del período principalmente estival y que en invierno no hay datos medidos, se procedió a calcular el caudal base según la Ecuación 2.21.

$$Q_{Base} = K_{Lento} \times S_{Lento} \times S \quad (\text{Ecuación 2.21})$$

Donde:

Q_{Base} : Caudal base (m^3/s); K_{Lento} : coeficiente de vaciamiento del reservorio lento; S_{Lento} : almacenamiento actual (mm); S : superficie de la cuenca (m^2).

Con S_{Lento} :

$$S_{Lento(ti+1)} = S_{Lento(ti)} + (P_{Total(ti)} - P_{efectiva(ti)}) - ET - (Q_{Base} \div S) \quad (\text{Ecuación 2.22})$$

$$P_{efectiva} = P_{Total} \times (S_{Lento} \div A)^y \quad (\text{Ecuación 2.23})$$

Donde:

$S_{Lento(ti+1)}$: almacenamiento actual en el paso de tiempo posterior a t_i (mm);
 $S_{Lento(ti)}$: almacenamiento actual en el paso de tiempo t_i (mm);
 $P_{Total(ti)}$: precipitación equivalente (mm) (Ecuación 2.23); ET' : evapotranspiración potencial (mm) calculada en base al método de Thornthwaite y Mather (Thornthwaite and Mather, 1955); Q_{Base} : caudal base (mm); S : superficie total de la cuenca (m²); A : capacidad máxima de almacenamiento (mm); y : parámetro de calibración.

$$P_{equivalente} = P_{Liquida} + M_{Nieve} \quad (\text{Ecuación 2.24})$$

Donde:

$P_{Liquida}$: precipitación líquida en la zona no glaciar (mm); M_{Nieve} : derretimiento real de nieve (mm).

2.2.4.2. Reservorio Rápido

Considerando que se está trabajando a nivel mensual:

$$Q_{Rapido} = P_{efectiva} \quad (\text{Ecuación 2.25})$$

Finalmente el caudal total (Q_{total}) para toda la cuenca corresponde a la sumatoria de los cuatro reservorios calculados previamente: Q_{nieve} , Q_{hielo} , Q_{Base} , Q_{Rapido} (Ecuación 2.6).

2.2.5. Resultados

2.2.5.1. Simulación de caudal para el período 1977 - 2000

El modelo tiene 9 parámetros que necesitan ser calibrados (Tabla 2.3). En la Figura 2.6 se presentan los resultados de la modelación efectuada aplicando las ecuaciones presentadas en las secciones anteriores y los parámetros iniciales de calibración que se exponen en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Parámetros iniciales de calibración aplicados.

#	Parámetro	Nombre	Valor	Unidad
1	X	Exponente de almacenamiento lento para la evapotranspiración	0,5	adimensional
2	Y	Exponente de almacenamiento lento para la precipitación efectiva	0,5	adimensional
3	K _{Hielo}	Constante lineal de tiempo del reservorio hielo	0,5	día
4	K _{Nieve}	Constante lineal de tiempo del reservorio nieve	0,5	día
5	K _{Lento}	Constante lineal de tiempo de vaciamiento del reservorio lento	0,5	día
6	A _{Hielo (sucio)}	Factor grado-día para hielo sucio	8,1	mm día ⁻¹ °C ⁻¹
7	A _{Hielo (limpio)}	Factor grado-día para hielo limpio	7,4	mm día ⁻¹ °C ⁻¹
8	A _{Nieve(sucia)}	Factor grado-día para nieve sucia	6,4	mm día ⁻¹ °C ⁻¹
9	A _{Nieve(limpia)}	Factor grado-día para nieve limpia	5,9	mm día ⁻¹ °C ⁻¹

En la Figura 2.6 también se presenta la comparación entre el caudal simulado y el caudal observado a nivel mensual en la Estación Estero Glaciar Echaurren. Con el fin de evaluar el resultado del modelamiento se calculó el índice de Nash (Musy *et al.*, 1998), observando la relación de las curvas del caudal simulado y observado y analizando su coeficiente de determinación. Se observa en la Figura 2.6 que el caudal simulado con los parámetros de la Tabla 2.3 se presenta muy sobreestimado respecto del caudal observado.

Para el ajuste final del caudal se hicieron diversos experimentos con diferente combinación de parámetros, ilustrándose el conjunto de parámetros óptimos en la Tabla 2.4, obteniendo el resultado que se presenta en la Figura 2.7 (Nash 0,9 y R²=0,24).

Tabla 2.4. Parámetros de calibración modificados.

1	X	0,5
2	Y	0,03
3	K _{Hielo}	0,5
4	K _{Nieve}	0,5
5	K _{Lento}	0,2
6	A _{Hielo (sucio)}	4,1
7	A _{Hielo (limpio)}	3,4
8	A _{Nieve (sucia)}	2,4
9	A _{Nieve (limpia)}	1,9

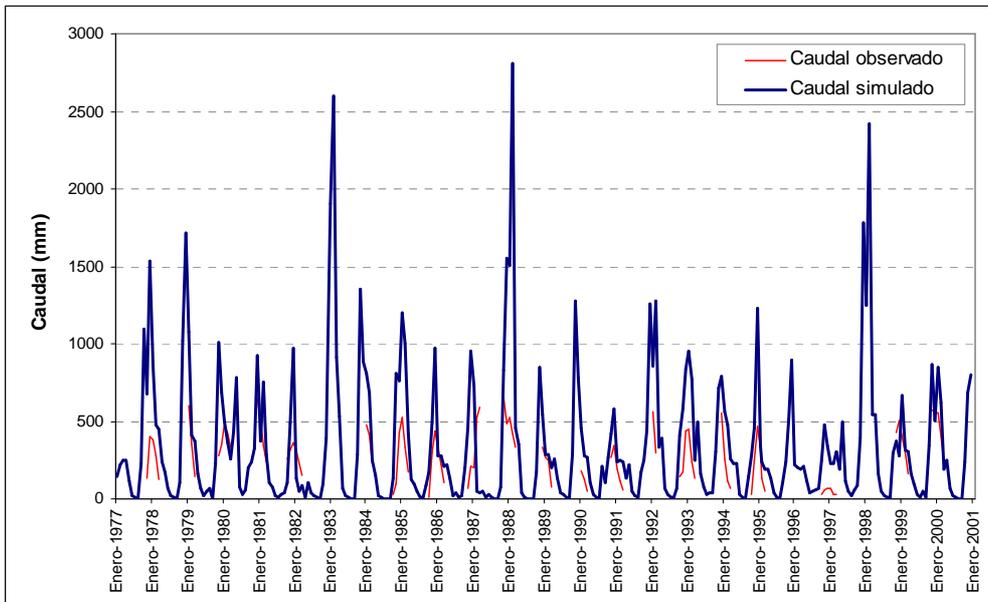


Figura 2.6. Resultados de la modelación con los parámetros iniciales presentados en la Tabla 2.3.

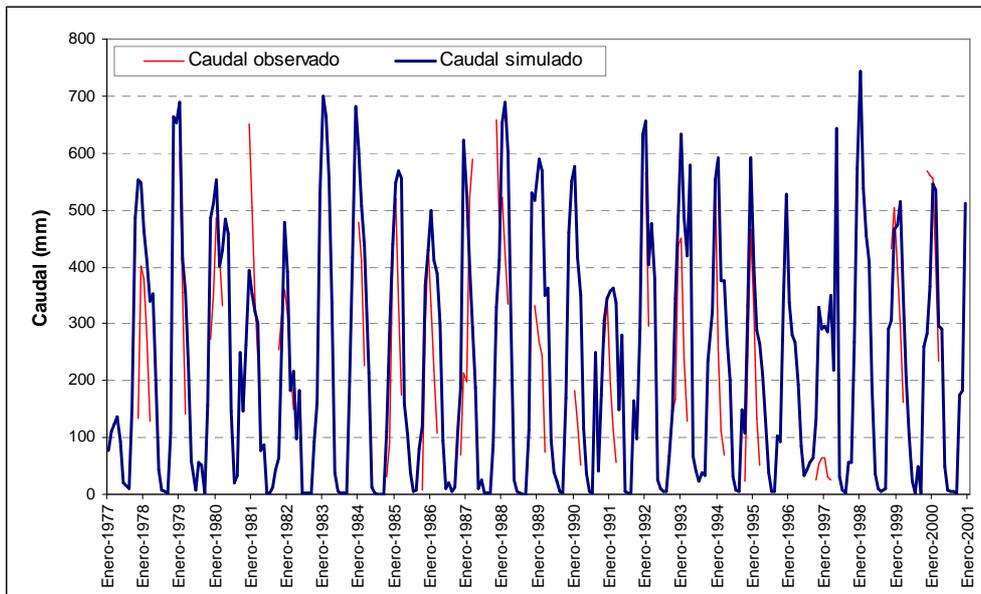


Figura 2.7. Resultados de la modelación óptima con los parámetros de calibración modificados según los valores de la Tabla 2.4.

2.2.5.2. Proyección del caudal de acuerdo a escenarios futuros de cambio climático

Con el fin de proyectar el caudal de la cuenca del Glaciar Echaurren en el futuro, se consideró las estimaciones de temperatura y precipitación para los escenarios A2 y B2 calculadas por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile (DGF, 2006) entre el año 2071 y 2100 (año medio 2085). El DGF utilizó el modelo regional de meso-escala PRECIS (Providing Regional Climates for Impact Studies) desarrollado por la Oficina Meteorológica del Reino Unido, con resolución espacial de 25 km, forzado mediante el modelo de circulación general HadCM3 (Hadley Center Climate Model, version 3). La temperatura indica el aumento en °C de la temperatura proyectada hacia fines

del presente siglo (2071-2100) con respecto al clima actual (1961-1990). La precipitación (pp) indica el cambio futuro proyectado para 2071-2100 expresado en % de la precipitación actual (1961-1990). DEF: Diciembre, Enero, Febrero; MAM: Marzo, Abril, Mayo; JJA: Junio, Julio, Agosto; SON: Septiembre, Octubre, Noviembre. ANUAL representa los promedios anuales de cambios de temperatura y precipitación, aproximados cada 0,5°C y cada 5% de precipitación.

Los parámetros utilizados para simular el caudal futuro son los que permitieron obtener la curva de caudal simulada más cercana a la curva observada. Los parámetros considerados se presentan en la Tabla 2.4. Los datos de entrada (temperatura y precipitación) se calculan a una escala de tiempo mensual según el estudio del Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile (DGF, 2006). Para la zona donde se localiza el glaciar Echaurren, dicho estudio contempla un aumento de temperatura y una disminución de precipitación para los escenarios A2 y B2, con variaciones estacionales según se indica en la Tabla 2.5. Ambos factores forzantes, el aumento de temperatura y la disminución de precipitación, provocan una fuerte tendencia de retroceso glaciar a futuro, hecho que está claramente evidenciado en el comportamiento de los glaciares de los Andes chilenos en las últimas décadas (Rivera *et al.*, 2008a).

Tabla 2.5. Cambios climáticos futuros calculados por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile para los escenarios A2 y B2 (DGF, 2006) para el período 2071-2100 para la cuenca del Echaurren Norte.

Escenario	Estación	T°C	pp%
A2	DEF	5	25-50
A2	MAM	4-5	100
A2	JJA	3-4	100
A2	SON	2-3	50-70
A2	ANUAL	4,0	75
B2	DEF	3-4	25-50
B2	MAM	3-4	100
B2	JJA	2-3	100
B2	SON	1-2	50-70
B2	ANUAL	3,0	75

Se consideró un ascenso futuro de la línea de equilibrio, basado en datos del radiosonda de Quintero/Santo Domingo (Carrasco *et al.*, 2005), que proyecta para la zona central de Chile un ascenso de la ELA de 440 m y 350 m en los escenarios A2 y B2, respectivamente, que se asume válido para la cuenca del río Pulido y del Echaurren Norte.

La variación del volumen y de la superficie glaciar se considera en el modelo según lo expuesto en el punto 2.2.3.2. Como resultado se observa una disminución del caudal tanto para el escenario A2 (Figura 2.8) y B2 (Figura 2.9). Asimismo, se observa una disminución del aporte por derretimiento de hielo, que es prácticamente nulo a partir del año 2030 en ambos escenarios. En el escenario A2 el glaciar Echaurren Norte desaparece el año 2040 (Figura 2.10) y en el escenario B2 desaparece el año 2046 (Figura 2.11).

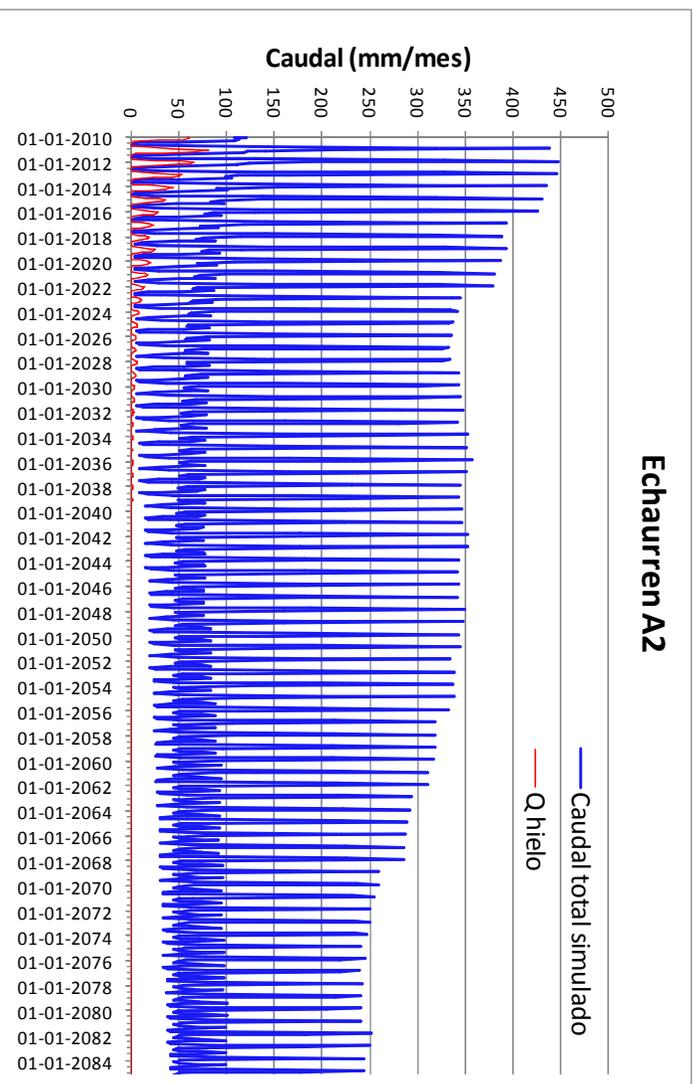


Figura 2.8. Caudal total y caudal proveniente del hielo simulado para el periodo 2010–2085 según el escenario de cambio climático A2. El caudal total es proporcional al área total de la cuenca.

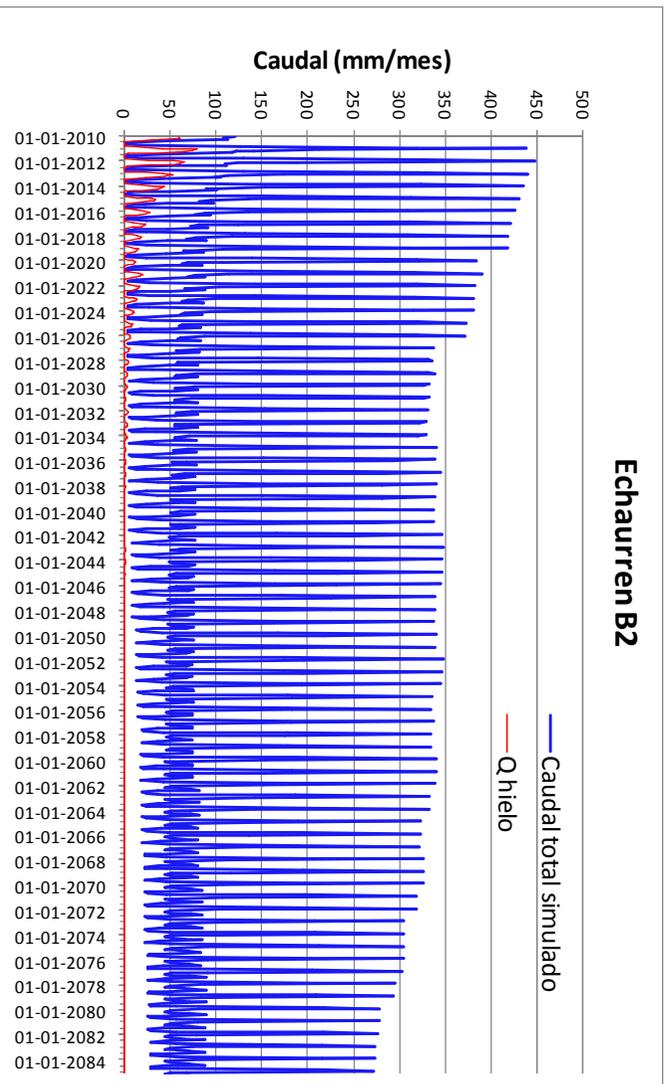


Figura 2.9. Caudal total y caudal proveniente del hielo simulado para el periodo 2010–2085 según el escenario de cambio climático B2.

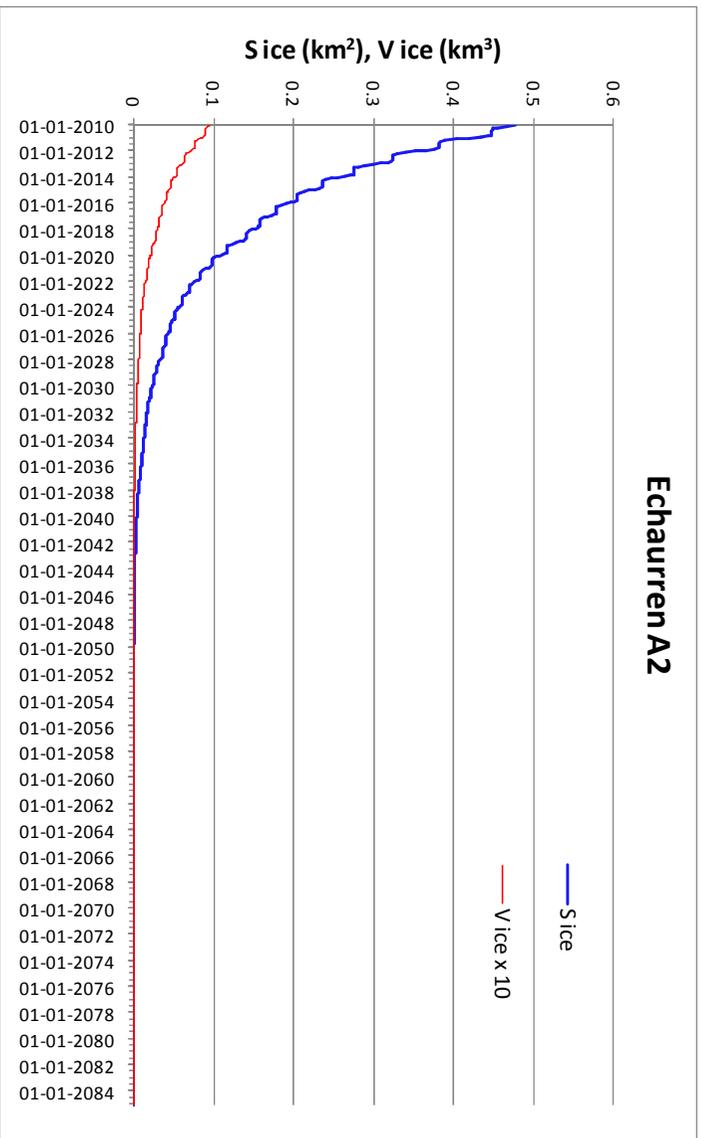


Figura 2.10. Variación de la superficie (Sice, azul) y el volumen (Vice, rojo) del glaciar Echaurren Norte en el escenario futuro A2 de cambio climático.

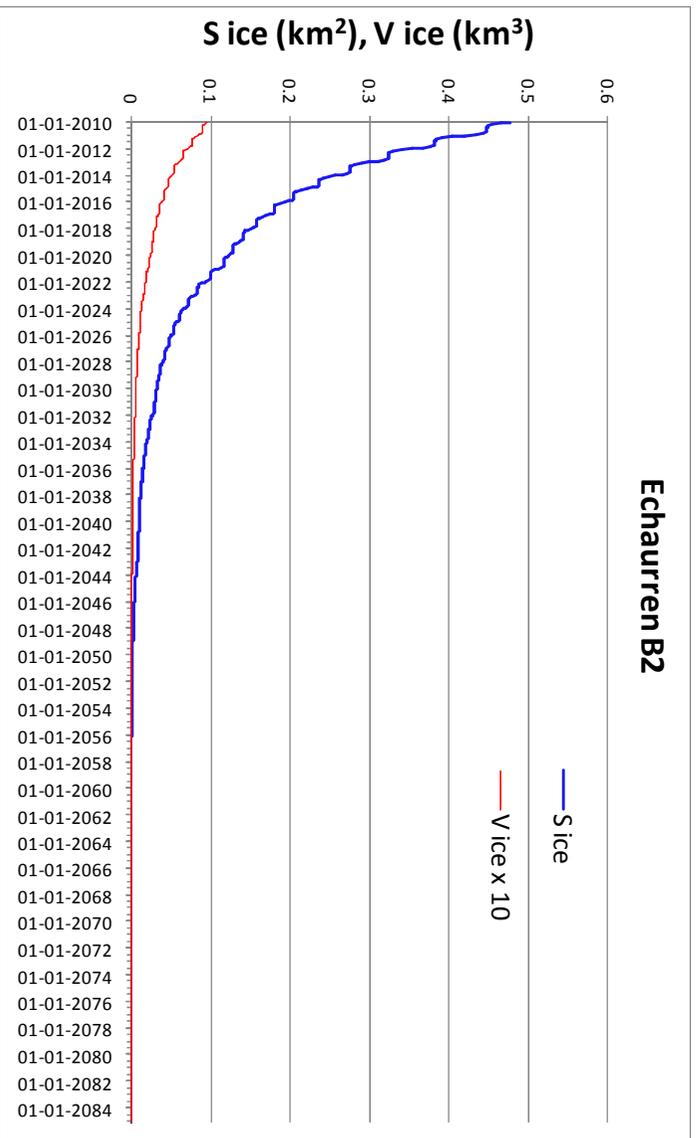


Figura 2.11. Variación de la superficie (Sice, azul) y el volumen (Vice, rojo) del glaciar Echaurren Norte en el escenario futuro A2 de cambio climático.

2.3. MODELAMIENTO HIDRO- GLACIOLÓGICO DE LA CUENCA DEL GLACIAR NEF

2.3.1. Localización y descripción del glaciar Nef

El glaciar Nef (coordenadas medias 47°00' S y 73°2 0' W) se localiza en el lado este de Campo de Hielo Norte (CHN) (Figura 2.12). Se trata de un glaciar de tipo temperado de 32 km de largo y con un ancho de aproximadamente 3 km en su frente (según la imagen ASTER del 27 de Febrero del año 2005). Posee una superficie total de 138 km² (Febrero 2005) y un AAR (razón entre el área de la zona de acumulación y su área total, o Accumulation Area Ratio en inglés) de 0,62 (Rivera *et al.*, 2007).

El glaciar Nef fluye desde 2.800 m s.n.m. de altura (punto culminante en la cumbre del cerro Largo) hasta aproximadamente 450 m s.n.m. y termina en un lago proglacial llamado lago Nef. El frente del glaciar es de tipo desprenderte (*calving*) y de acuerdo a Warren *et al.*, (2001) su frente posee una altura de aproximadamente 30 m sobre el nivel del lago.

La altitud de la línea de equilibrio del glaciar (o Equilibrium Line Altitude ELA, en inglés) fue estimada por Rivera *et al.*, (2007) a 1.183 m s.n.m. para el año hidrológico 2001 – 2002, valor que fue considerado para el modelamiento. Una altitud de 1.350 m s.n.m. fue determinada por Rignot *et al.*, (2003) para la ELA. Casassa (1987) estimó la línea de nieve a 1.350 m s.n.m. a través de observaciones de terreno llevadas a cabo en Noviembre y Diciembre del año 1983. En la misma oportunidad Casassa (1987) calculó igualmente el espesor de hielo en varios perfiles de la zona de ablación y de la zona de acumulación del glaciar Nef usando mediciones gravimétricas, obteniendo un valor máximo de 1.006 +/- 250 m y un valor promedio para 34 mediciones de 450 +/- 150 m.

2.3.2. Aspectos generales para la aplicación del modelo a la cuenca del río Nef

2.3.2.1. Sistema de Información Geográfica (SIG)

El SIG elaborado para el estudio del glaciar Nef se compone de la siguiente información de base:

- Imágenes satelitales

Para la confección del SIG se utilizaron principalmente imágenes satelitales ASTER, Landsat y SPOT. Las fechas de adquisición que corresponden a cada una de ellas se detallan en la Tabla 2.6.

En una primera etapa del trabajo las imágenes satelitales fueron ortorectificadas, corregidas radiométricamente y georeferenciadas. Posteriormente se definió una composición falso color para cada una de ellas.

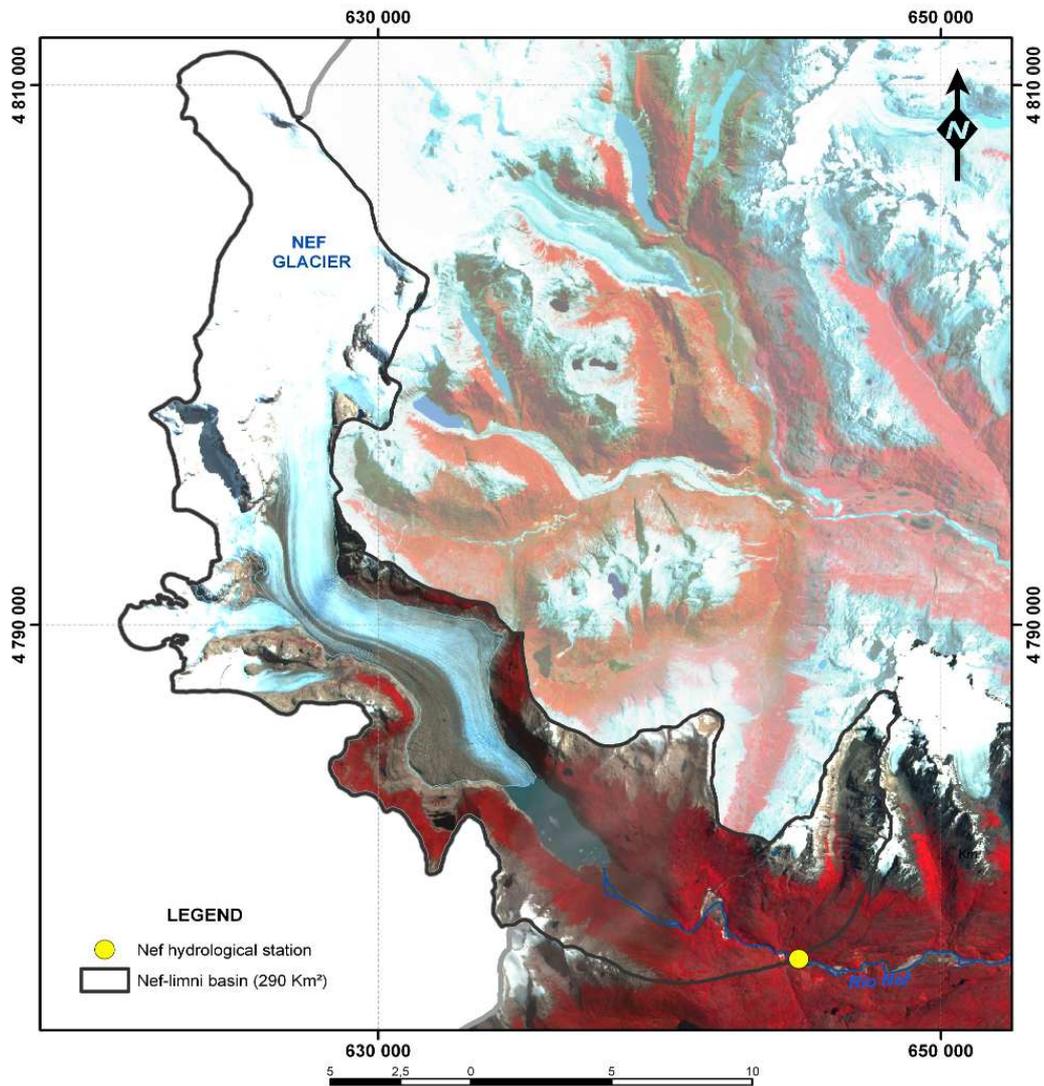


Figura 2.12. Localización del glaciar Nef. Imagen ASTER VNIR (15 m de resolución), 27 de Febrero 2005.

Tabla 2.6. Imágenes satelitales utilizadas y sus respectivas fechas de adquisición.

IMAGENES SATELITALES			
LANDSAT MSS	SPOT 2	LANDSAT ETM+	ASTER
22/01/1979	27/01/1999	11/03/2001	27/02/2005
09/02/1987			04/02/2008
02/26/1986			

- Modelo Digital de Elevación (MDE)

Para el procesamiento de la cuenca del Río Nef, se dispuso del MDE SRTM. Dicho MDE fue utilizado para la ortorectificación de imágenes satelitales, para el trazado de las divisorias de cuencas y también para el cálculo de curvas de nivel (Figura 2.13).

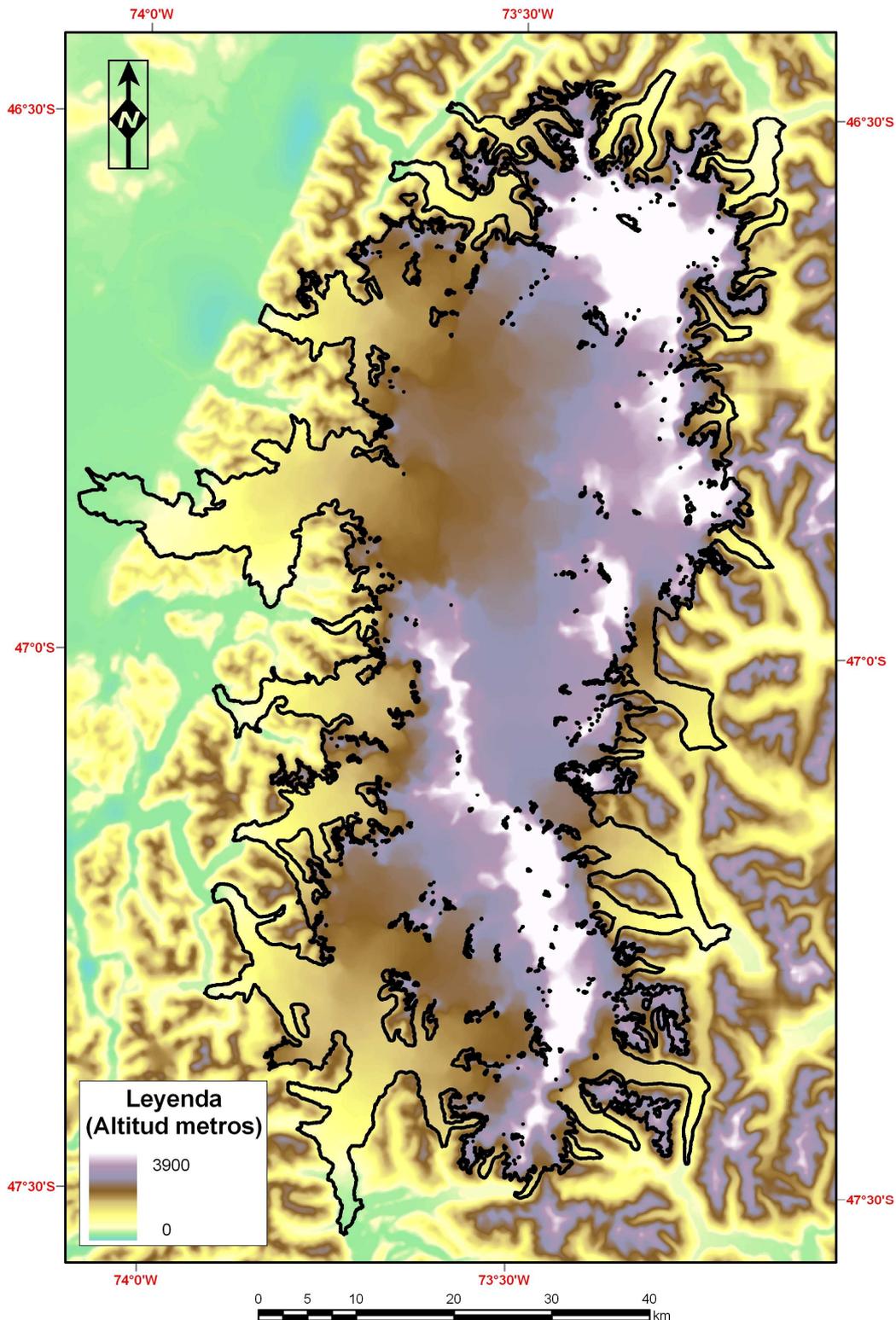


Figura 2.13. Modelo Digital de Elevación SRTM de CHN. El mapa de elevación está representado en la proyección UTM (zona 18) y el Datum WGS 1984.

Teniendo como base las imágenes satelitales y el MDE se pudo:

- Definir la divisoria de cuencas
- Calcular las curvas de nivel sobre el glaciar y confeccionar una curva hipsométrica
- Actualizar cambios de superficie del glaciar hasta el año 2008.
- Definición de cuencas

La definición de cuencas se realizó para una zona más amplia que aquella limitada por el glaciar Nef. Esto se debe a que se utilizan datos hidro-meteorológicos de dos estaciones localizadas en las cercanías del Río Baker: Desagüe Lago Bertrand (D. L. Bertrand) y Angostura Chacabuco (A. Chacabuco). Las cuencas definidas se obtuvieron sobre la base de un mosaico elaborado con imágenes SPOT de Enero del año 1999 (Figura 2.14).

- Curvas de nivel

Se calcularon curvas de nivel a una equidistancia de 100 m utilizando el MDE SRTM descrito anteriormente.

- Cambios de superficie hasta Febrero 2008

Las imágenes satelitales Landsat MSS, Landsat ETM+ y ASTER fueron utilizadas para estimar variaciones de cambio de superficie del glaciar. Se estima que entre los años 1979 y 2008 el glaciar Nef perdió 5 km² de su sector frontal y entre el año 2005 y 2008 la pérdida fue de 0,2 km². Según Rivera *et al.*, (2007) los glaciares Nef y Colonia son los glaciares orientales que han presentado la reducción de superficie de hielo más importante de todo CHN, con pérdidas de 7,9 km² (5,7%) y 9,1 km² (2,7%) respectivamente en el período 1979-2001.

2.3.2.2. Datos hidro-meteorológicos disponibles para la cuenca del río Nef

2.3.2.2.1. Caudal

Los caudales de las cuencas correspondientes a Desagüe Lago Bertrand (D.L. Bertrand) y Angostura Chacabuco (A. Chacabuco) han sido medidos en las estaciones fluviométricas homónimas. Ambas estaciones se encuentran separadas por una distancia de 21,1 km a lo largo del río Baker. Desde la confluencia del río Baker con el río Nef hasta la estación D.L. Bertrand se recorren 13,4 km hacia aguas arriba y desde dicha confluencia hasta la estación A. Chacabuco se recorren 7,7 km hacia aguas abajo (Figura 2.14).

Las series de datos de caudal disponibles en las estaciones fluviométricas D.L. Bertrand y A. Chacabuco comienzan el año 1963 y 1976, respectivamente;

y en ambas estaciones se realizan mediciones hasta la fecha. En el presente análisis se consideraron los datos correspondientes al período 1977 – 2000, sin embargo durante algunos periodos existen algunas fechas con datos faltantes.

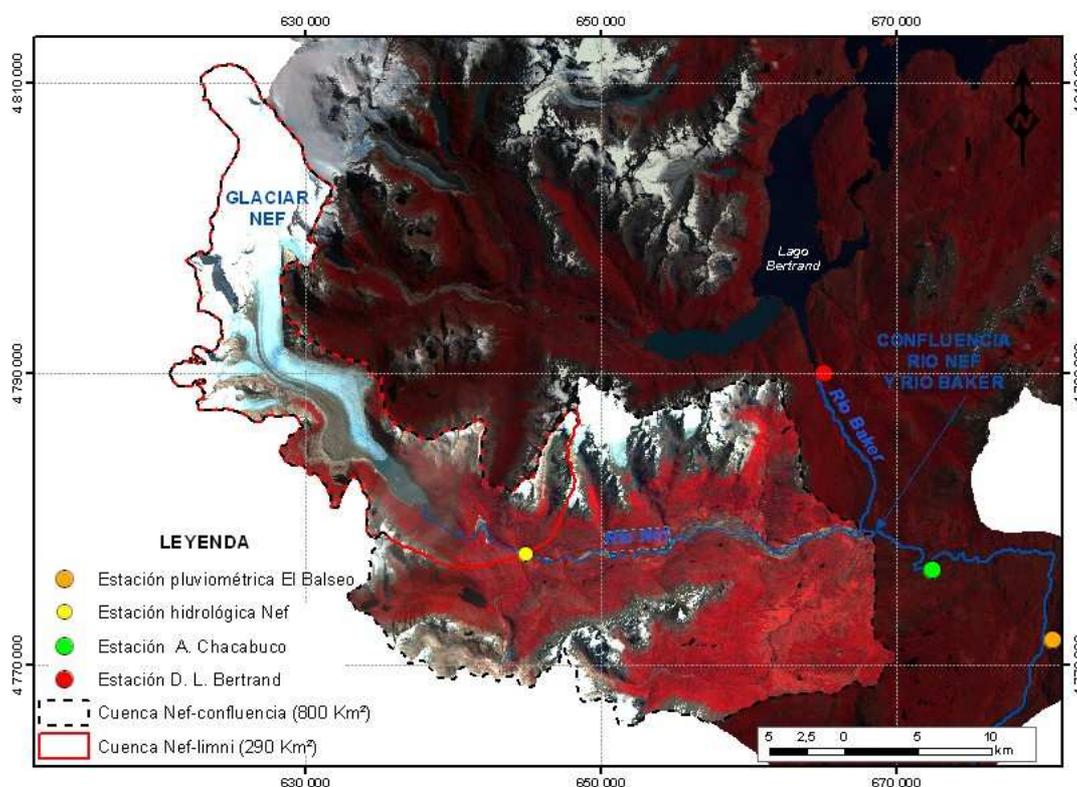


Figura 2.14. Localización de estaciones D.L. Bertrand, A. Chacabuco y El Balseo en mosaico de imágenes SPOT del 27 Enero 1999.

2.3.2.2.2. Nivel de agua y descarga en la estación hidrológica del río Nef

En Abril del año 2005, la DGA de Aysén (en colaboración con el Institut de Recherche pour le Développement, IRD, de Francia) instaló un limnógrafo tipo transductor marca SERPE – IESM en el río Nef a una distancia de 12 km aproximadamente del frente glaciar (Figura 2.14) lo que permitió medir a partir de esa fecha el nivel diario de agua del río Nef.

Lamentablemente, en dos periodos importantes (Febrero - Octubre 2006, Marzo – Abril 2007 y desde Enero 2008) no hay datos disponibles debido a un accidente que sufrió la sonda y al posterior robo del equipamiento.

El principal problema que ha existido para el mantenimiento de esta estación corresponde a la dificultad de acceder al área donde se localiza. Dicho problema de acceso explica que hasta la fecha se hayan realizado sólo dos campañas de aforo: el 20 de Abril del año 2007 ($29 \text{ m}^3/\text{s}$ con un nivel de agua de 1,39 m) y el 5 de Noviembre del año 2008 ($88,4 \text{ m}^3/\text{s}$ con un nivel de agua de 2,20 m).

Debido a lo anterior, para el presente trabajo de modelamiento, se considerará la cuenca del río Nef hasta la confluencia de este último con el río

Baker la que abarca una superficie de 800 km² con un 17,3 % de área glaciar. De acuerdo a López (2007) el caudal reconstituido (por diferencia) en la confluencia del río Nef con el río Baker, está controlado de manera significativa por el aporte glaciar proveniente del glaciar Nef.

2.3.2.2.3. Datos meteorológicos (precipitación y temperatura)

Para el presente análisis se utilizó la temperatura y precipitación a nivel mensual observada en la estación meteorológica Cochrane Aeródromo de la Dirección Meteorológica de Chile. Las variables de entrada son procesadas en bandas de elevación de 100 metros y, por consiguiente, se aplicó un gradiente para la precipitación y para la temperatura. El gradiente de temperatura corresponde a 0,65 °C/100 m que es un valor representativo para la atmósfera libre (ver 2.2.2.1). El gradiente de precipitación fue calculado en base a la nieve acumulada durante el invierno 2008 (1.600 mm entre 960 y 1.712 m s.n.m.) (DGA, 2008a) medida con altimetría láser y a la precipitación observada (460 mm) durante el mismo periodo en la estación Cochrane Aeródromo (182 m s.n.m.). Se estimó que entre 960 y 1.712 m s.n.m. la precipitación es 3,5 veces mayor que en la estación meteorológica Cochrane Aeródromo.

2.3.3. Resultados

2.3.3.1. Simulación de caudal para el período 1977 - 2001

El caudal de la cuenca del río Nef fue simulado utilizando el mismo modelo aplicado para la cuenca Echaurren descrito en las secciones 2.1 y 2.2 del presente informe. De la misma forma, el intervalo de tiempo considerado es mensual. Los datos de entrada del modelo son precipitación y temperatura registradas en la estación meteorológica Cochrane Aeródromo.

También se toman en consideración el MDE de la cuenca, la superficie tanto de la cuenca del río Nef como del glaciar y los parámetros correspondientes para las distintas ecuaciones y parametrizaciones. Los factores grado-día iniciales considerados son aquellos presentados en la Tabla 2.2. La ELA de referencia corresponde a aquella estimada por Rivera *et al.*, (2007), vale decir 1.183 m s.n.m. para el año hidrológico 2001 – 2002.

El modelo entrega como resultado el caudal simulado (Figura 2.15). Para el primer modelamiento en la cuenca del río Nef se utilizaron los parámetros descritos en la Tabla 2.7. Dichos valores corresponden a los parámetros de inicio para las tres cuencas estudiadas (Echaurren Norte, Nef, Pulido). En la Figura 2.16 se observa el resultado obtenido.

El caudal simulado fue posteriormente comparado con el caudal calculado por diferencia entre la estación D. L. Bertrand y Angostura Chacabuco.

Tabla 2.7. Parámetros de calibración aplicados.

K_{Hielo}	0,5
k_{Nieve}	0,5
Y	0,5
X	0,5
K_{Lento}	0,5
$A_{\text{Hielo (sucio)}}$	8,1
$A_{\text{Hielo (limpio)}}$	7,4
$A_{\text{Nieve (sucia)}}$	6,4
$A_{\text{Nieve (limpia)}}$	5,9

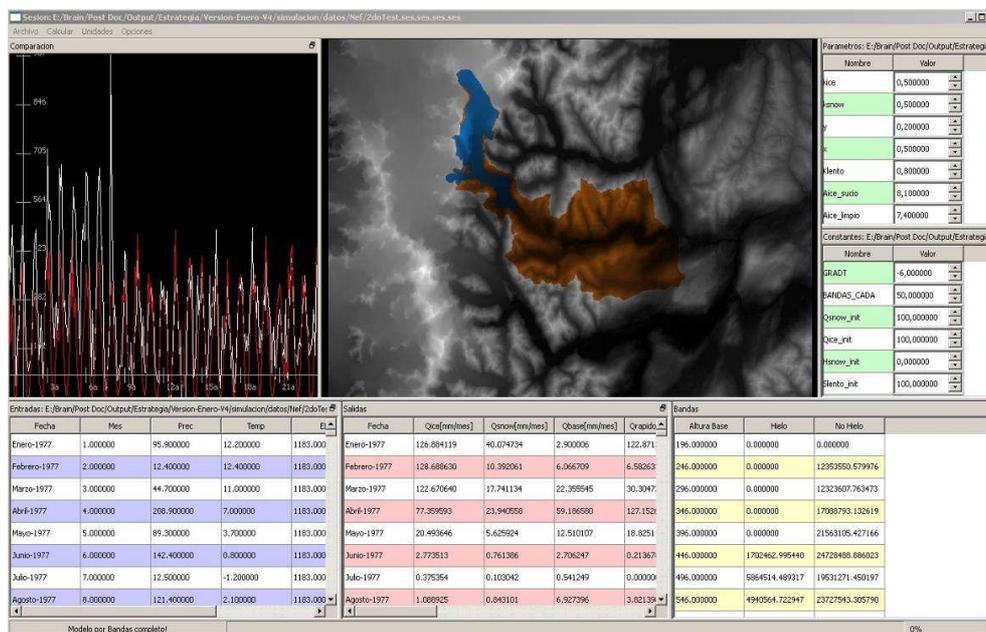


Figura 2.15. Ejemplo de resultados directos obtenidos del modelo para simulación de caudal del río Nef.

En la Figura 2.16 se muestra que el caudal simulado está sub-estimado entre los años 1977 y 1985 y, sobre-estimado entre 1986 y 2000, con respecto a los caudales observados. Es importante destacar que entre 1977 y 1985 el caudal promedio mensual observado en la cuenca es mayor (311 mm) que entre 1986 y 2000 (216 mm), con peaks que sobrepasan los 600 mm/mes para los años 1980, 1981, 1982, 1983 y 1984.

Con el fin de analizar si las diferencias entre los caudales simulados y observados durante ambos períodos se originan por el comportamiento de las variables climáticas, se comparó, para el periodo 1977 – 2001, las fluctuaciones mensuales de caudal observado con las fluctuaciones mensuales de la precipitación y la temperatura registradas en la estación Cochrane Aeródromo.

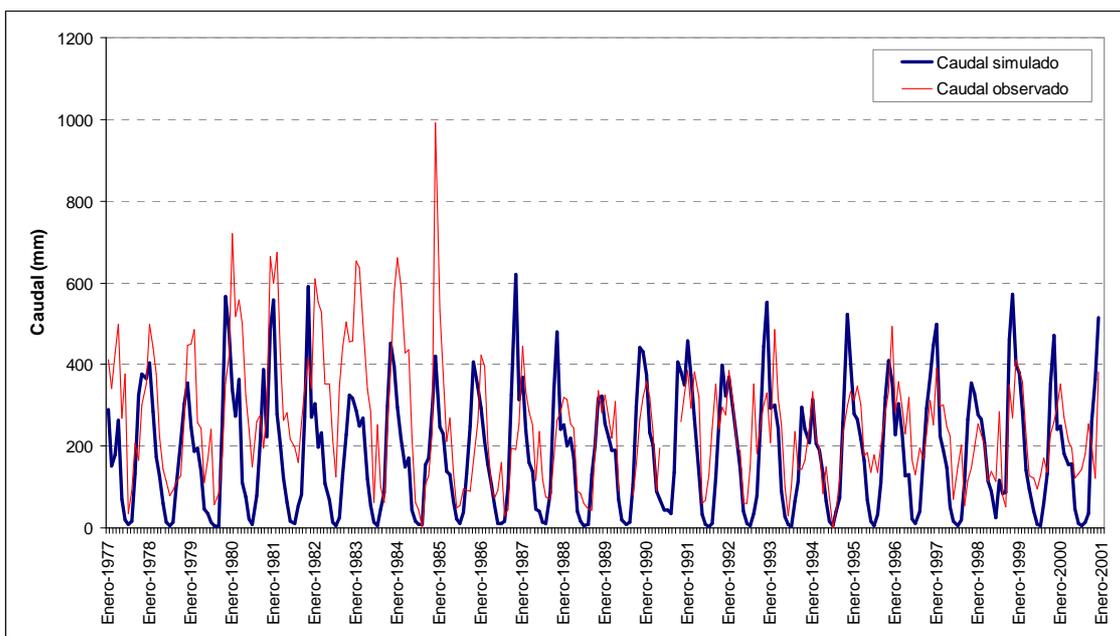


Figura 2.16. Resultados de la modelación de caudal (a una escala de tiempo mensual) para el período 1977–2000 aplicando los parámetros expuestos en la Tabla 2.7.

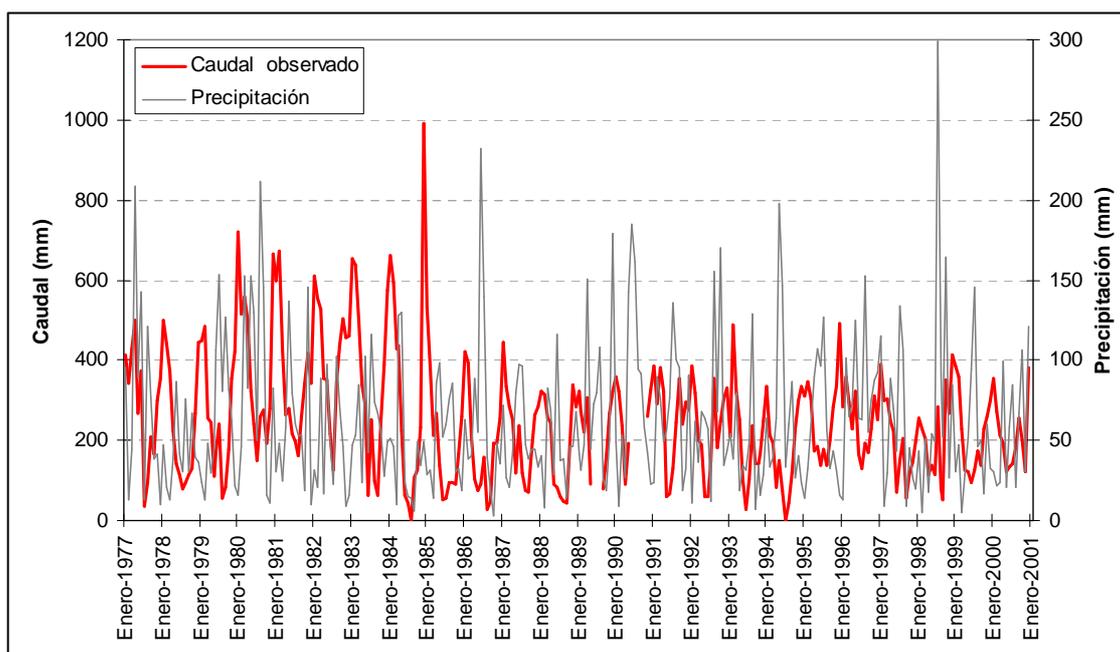


Figura 2.17. Caudal mensual observado en confluencia Nef-Baker y precipitación mensual en estación Cochrane Aeródromo.

La Figura 2.17 y la Figura 2.18 muestran la relación del caudal con la precipitación y la temperatura, respectivamente. Se observa para ambas variables climáticas una fluctuación regular sin cambios importantes entre el periodo 1977-1985 y 1986-2000, por lo tanto, la diferencia de caudal observada entre ambos periodos podría deberse, por ejemplo, a un cambio en los protocolos de medición. Debido a lo anterior, para el modelamiento hidrológico de la cuenca del río Nef, se considerará sólo el periodo 1986–2000 (Figura 2.19).

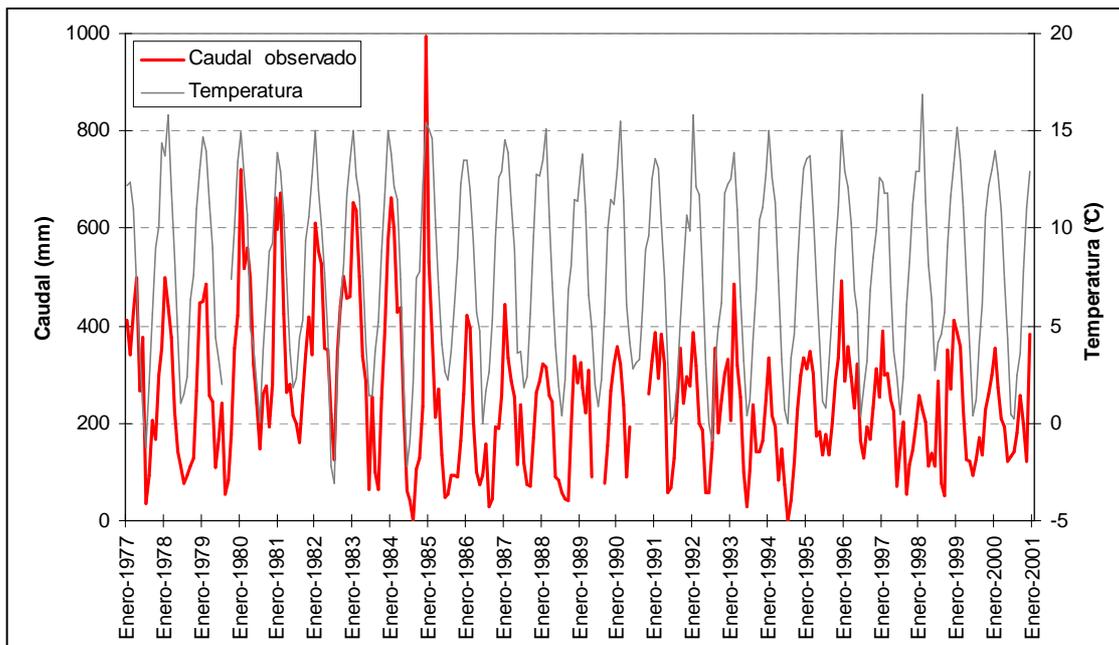


Figura 2.18. Caudal observado en confluencia Nef-Baker y temperatura estación Cochrane Aeródromo.

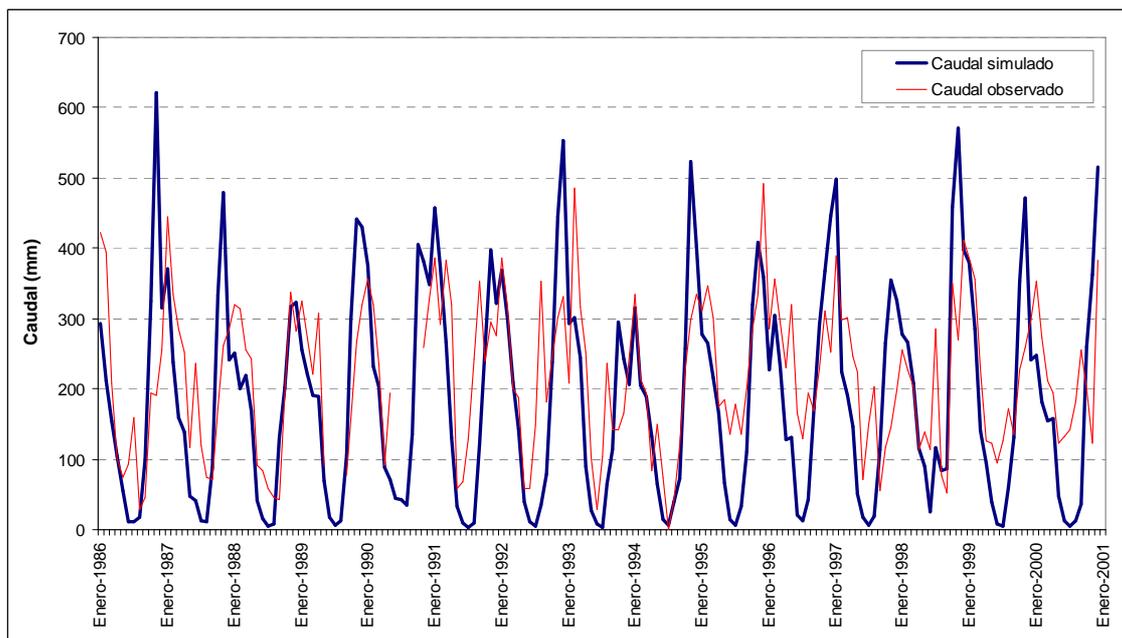


Figura 2.19. Resultados de la modelación de caudal para el período 1986–2000 aplicando los parámetros expuestos en la Tabla 2.7.

Tal como se observa en la Figura 2.19, el caudal simulado para el periodo 1986–2000 está sobreestimado respecto del caudal observado. Por otra parte, el coeficiente de determinación entre ambas series de datos (observado y simulado) es de $R^2=0,4$. Con el fin de mejorar tanto la relación entre ambas curvas como el coeficiente de determinación mencionado, se procedió a modificar los parámetros de calibración del modelo (k_{Hielo} , K_{Nieve} , x , y , K_{Lento} , A_{Hielo} y A_{Nieve}). Se realizaron 15 test con diferentes combinaciones de dichos parámetros. La Tabla 2.8 muestra los parámetros finales de calibración seleccionados.

Tabla 2.8. Parámetros de calibración seleccionados para la simulación de caudal.

K_{Hielo}	0,5
k_{Nieve}	0,5
y	0,2
x	0,5
K_{Lento}	0,8
$A_{\text{Hielo (sucio)}}$	8,1
$A_{\text{Hielo (limpio)}}$	7,4
$A_{\text{Nieve (sucia)}}$	2,0
$A_{\text{Nieve (limpia)}}$	1,5

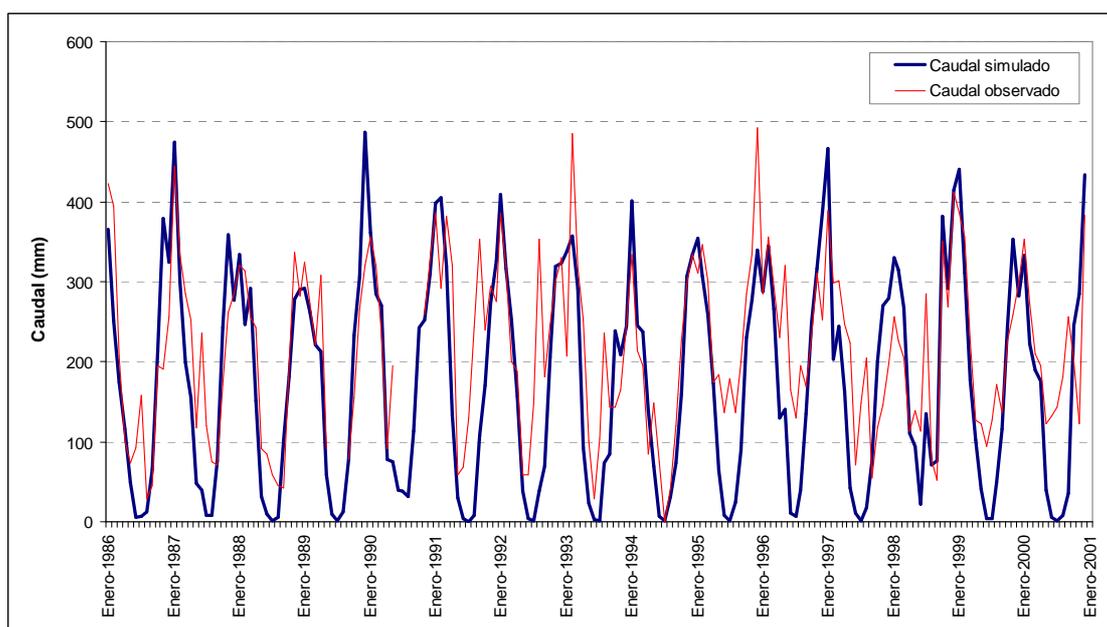


Figura 2.20. Resultados de la modelación con los parámetros de calibración modificados y expuestos en la Tabla 2.8.

Se observa en la Tabla 2.8 que los parámetros k_{Hielo} y K_{Nieve} se mantuvieron idénticos a los considerados originalmente puesto que al modificarlos no se observaron cambios significativos en el caudal simulado.

Por otra parte, se observó que al disminuir los factores grado-día del hielo (sucio y limpio) (3 puntos) se redujo el coeficiente de determinación a $R^2=0,48$. Los factores grado-día correspondientes al hielo sucio (8,1) y a la nieve sucia (2) fueron aplicados desde Enero hasta Abril, en tanto que los factores grado-día para el hielo limpio (7,4) y nieve limpia (1,5) fueron aplicados desde Mayo hasta Diciembre.

En la Figura 2.20 se muestra una comparación entre el caudal simulado con los parámetros de calibración expuestos en la Tabla 2.8 y el caudal observado.

Se obtuvo un coeficiente de determinación de $R^2=0,61$ (Figura 2.21) y un coeficiente de Nash de 0,9.

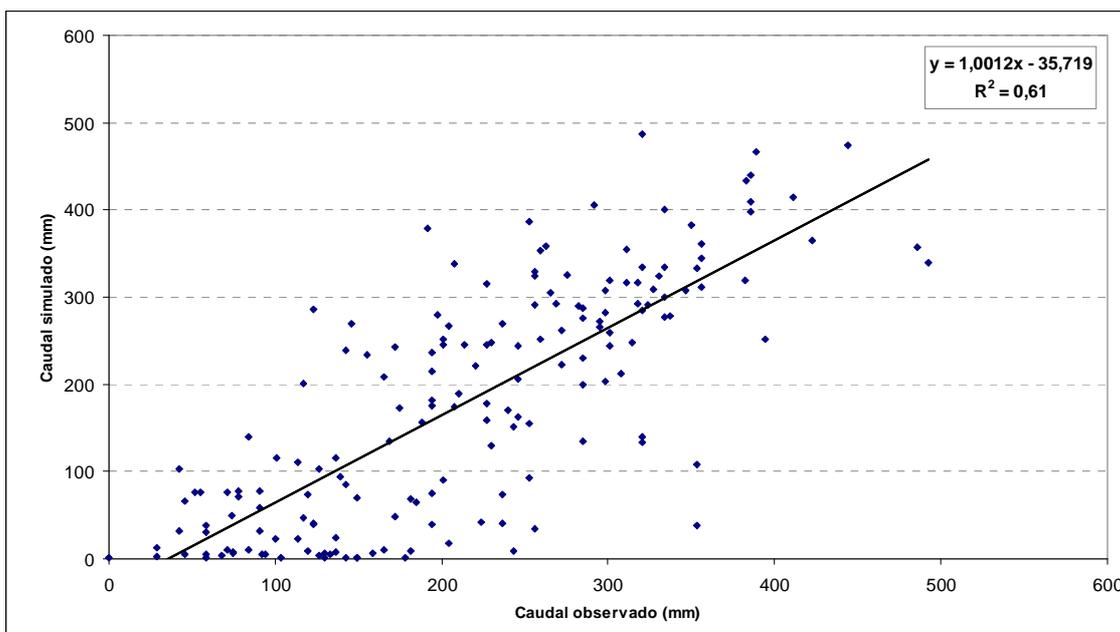


Figura 2.21. Correlación entre el caudal mensual simulado y el caudal mensual observado aplicando los parámetros de calibración modificados.

Como resultado del modelamiento en la cuenca del río Nef, se puede mencionar que:

- El modelo es sensible a la variación de los factores grado-día (especialmente de la nieve).
- El caudal se mantiene sobreestimado especialmente para los años 1987, 1989, 1994, 1998 y 1999.
- En general, los valores de caudal estimado para los meses de invierno son inferiores al caudal observado durante dicho período, lo que indica que el caudal base simulado se mantiene subestimado a pesar de la modificación efectuada a los parámetros y , x y K_{Lento} que intervienen en dicho reservorio. Dicho problema podría provenir de los datos de precipitación utilizados ya que probablemente la variabilidad intra-anual de la estación Cochrane Aeródromo no representa correctamente las fluctuaciones de la cuenca del río Nef. También es posible que dicho problema se origine en el gradiente altitudinal de la temperatura. Lo anterior se podría mejorar, a futuro, si se realizan mediciones de precipitación y temperatura en la cuenca del río Nef.

2.3.3.2. Proyección del caudal de acuerdo a escenarios futuros de cambio climático

A partir del informe del Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile (DGF, 2006) se obtuvieron las proyecciones climáticas futuras para la cuenca del Nef. El DGF utilizó el modelo regional de meso-escala PRECIS (Providing Regional Climates for Impact Studies) desarrollado por la Oficina Meteorológica del Reino Unido, con resolución espacial de 25 km, forzado mediante el modelo de circulación general HadCM3 (Hadley Center Climate Model, version 3).

En la Tabla 2.9, la columna T°C indica el aumento de temperatura (en °C) proyectado hacia fines del presente siglo (2071-2100) con respecto al clima actual (1961-1990). Por su parte, la columna pp indica el cambio futuro de precipitación proyectado para 2071-2100 expresado en % de la precipitación actual (1961-1990). DEF: Diciembre, Enero, Febrero; MAM: Marzo, Abril, Mayo; JJA: Junio, Julio, Agosto; SON: Septiembre, Octubre, Noviembre. ANUAL representa los promedios anuales de cambios de temperatura y precipitación, aproximados cada 0,5°C y cada 5% de precipitación.

Tabla 2.9. Cambios climáticos futuros calculados por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile para los escenarios A2 y B2 (DGF, 2006) para el período 2071-2100 para la cuenca del Nef.

Escenario	Estación	T°C	pp %
A2	DEF	3-4	50-70
A2	MAM	2-3	80-90
A2	JJA	1-2	120
A2	SON	1-2	100
A2	ANUAL	2,0	90
B2	DEF	2-3	50-70
B2	MAM	1-2	100
B2	JJA	1-2	100
B2	SON	1-2	80-90
B2	ANUAL	2,0	85

Para el glaciar Nef, se considera que el ascenso de la ELA es la mitad del ascenso de la ELA en la zona de Santiago (220 m y 175 m para los escenarios A2 y B2, respectivamente), basado en los valores determinados para el ascenso de la isoterma cero en el período 1958-2000 a partir de los datos para el radiosonda de Quintero/Santo Domingo, Puerto Montt y Punta Arenas, de acuerdo a los resultados presentados por Carrasco *et al.*, (2008). La variación del volumen y de la superficie glaciar se considera en el modelo según lo expuesto en el punto 2.2.3.2.

Los caudales simulados para los escenarios futuros de cambio climático se observan en la Figura 2.22 y Figura 2.23. Cabe mencionar que para la región de Patagonia, los escenarios A2 y B2 son muy similares, con un aumento promedio anual de temperatura de 2°C y una precipitación promedio anual del 90% y 85% del valor actual para los escenarios A2 y B2, respectivamente. Como resultado se observa una disminución del caudal tanto para el escenario A2 (Figura 2.22) y B2 (Figura 2.23), a pesar que los caudales mínimos (que ocurren en invierno) aumentan levemente. Se observa asimismo una disminución del aporte por derretimiento de hielo. Para el cálculo del volumen inicial se asumió que el espesor promedio del glaciar es de 450 m, basado en 34 datos de espesor obtenidos en la zona de acumulación y la zona de ablación del glaciar Nef mediante gravimetría por Casassa (1987). El glaciar Nef disminuye de 138 km² el año 2010 a 84 km² el año 2085 en el escenario A2 (Figura 2.24), y a 86 km² el año 2085 en el escenario B2 (Figura 2.25).

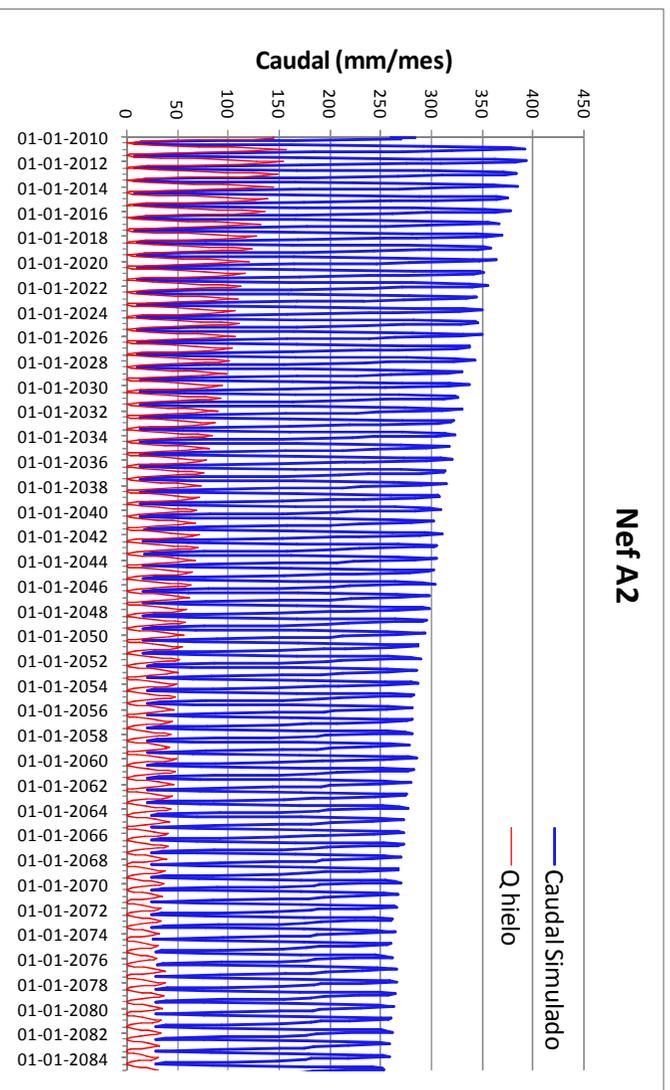


Figura 2.22. Caudal total (para el área total de la cuenca) y caudal proveniente del hielo simulado para el periodo 2010–2085 según el escenario de cambio climático A2.

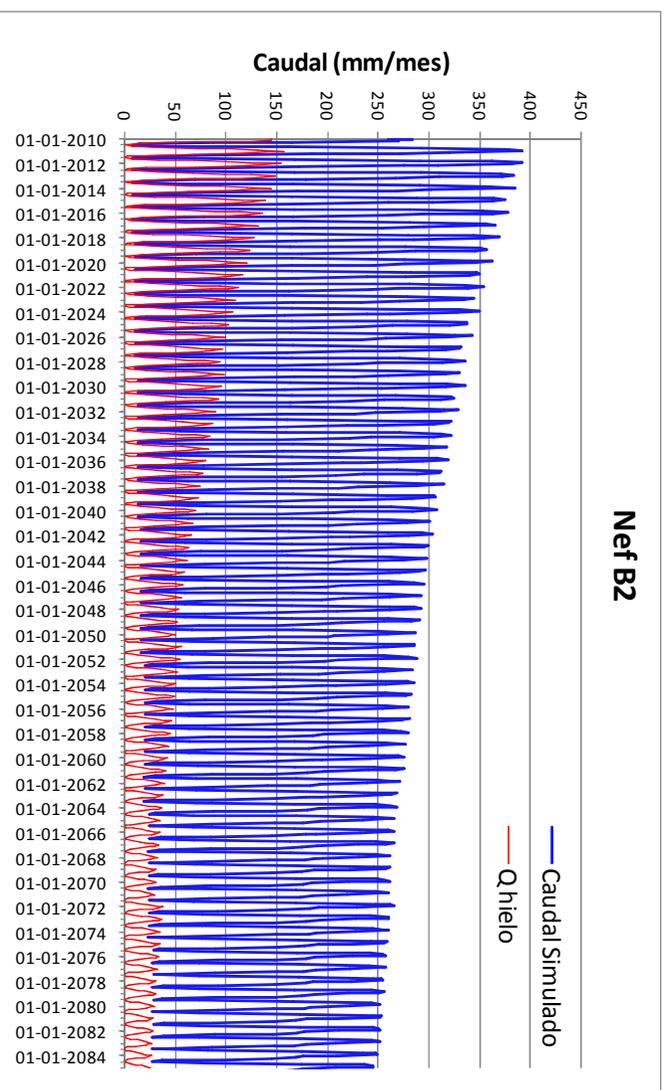


Figura 2.23. Caudal total (para el área total de la cuenca) y caudal proveniente del hielo simulado para el periodo 2010–2085 según el escenario de cambio climático B2.

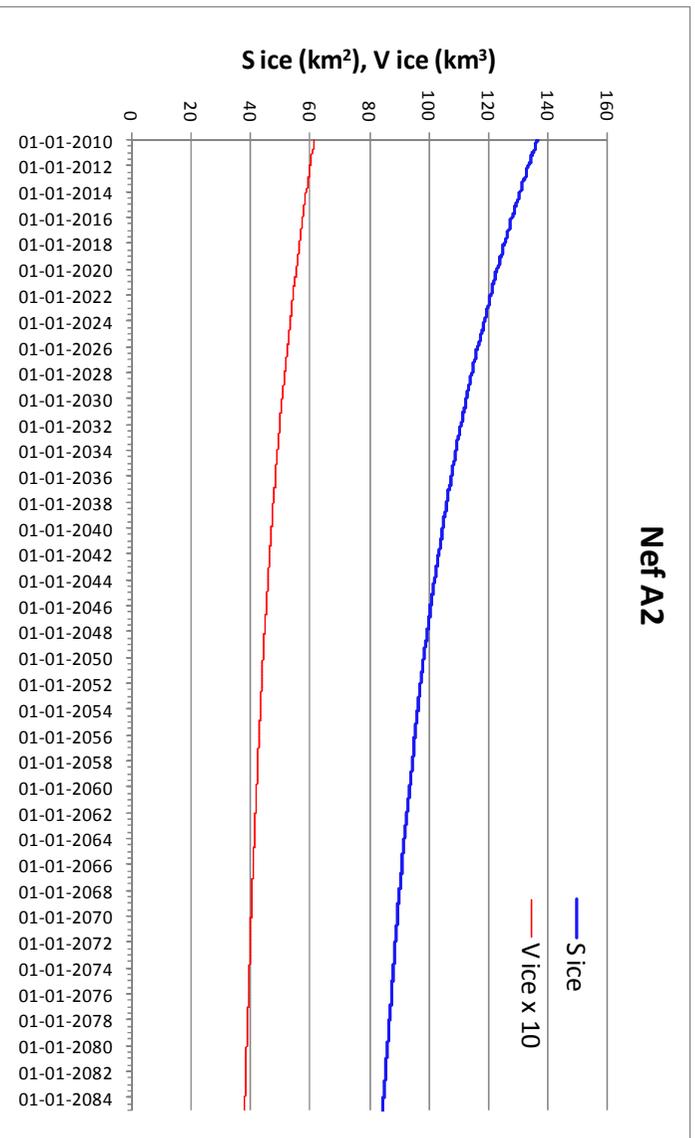


Figura 2.24. Variación de la superficie (Sice, azul) y el volumen (Vice, rojo) del glaciar Nef en el escenario futuro A2 de cambio climático.

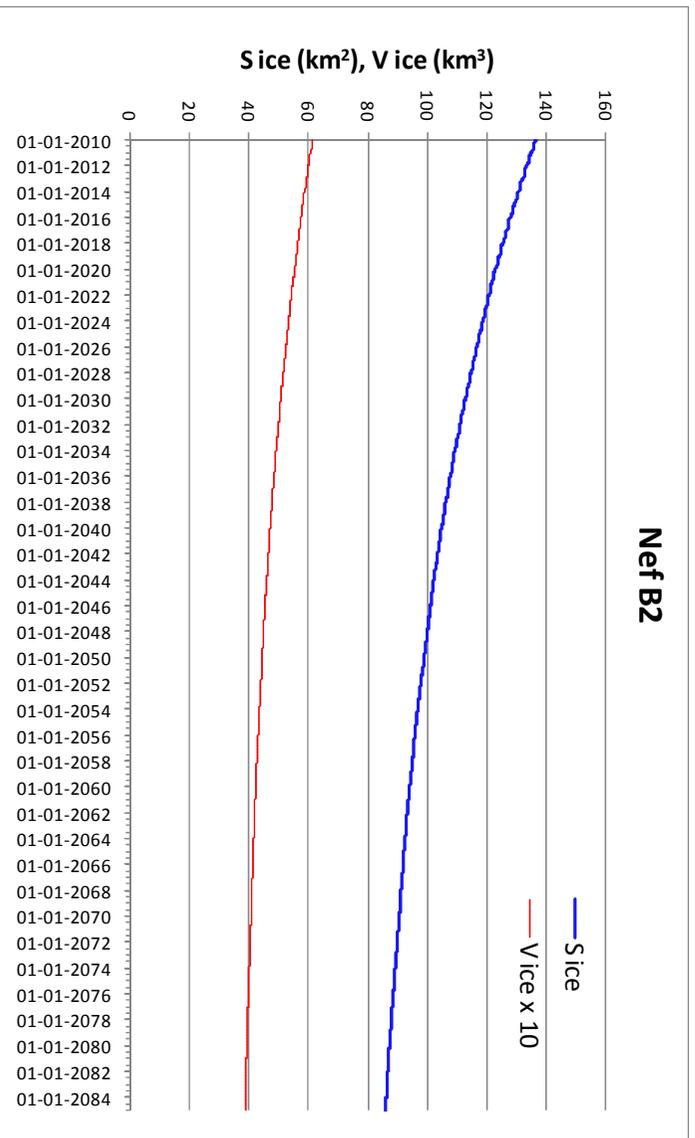


Figura 2.25. Variación de la superficie (Sice, azul) y el volumen (Vice, rojo) del glaciar Nef en el escenario futuro B2 de cambio climático.

2.4. MODELAMIENTO HIDRO-GLACIOLÓGICO DE LA CUENCA DEL RÍO PULIDO, COPIAPÓ

2.4.1. Localización y descripción de la cuenca

La cuenca del río Pulido forma parte de la cuenca del río Copiapó, ubicada en la III región de Atacama, en las coordenadas medias 28°15'S y 69°40'W, con una superficie de 2.038 km² hasta la confluencia con el río Jorquera, denominado La Junta (Figura 2.26). Hidrográficamente, la cuenca del río Copiapó está compuesta por las subcuencas de los ríos Jorquera, Pulido, Manflas y la quebrada de Paipote, pero sólo los tres primeros ríos aportan caudales superficiales.

El inventario de los glaciares de la cuenca del río Copiapó ha sido realizado por Vivero (2008) a partir de imágenes satelitales Aster del 14 de enero de 2001 y del 12 de marzo de 2002, de una resolución espacial de 15 m. La cuenca del río Copiapó presenta un área glaciar total de 23,04 km² distribuida en 92 cuerpos de hielo mayores a 0,01 km². El glaciar mayor es Del Potro con 4,88 km² (cuenca del río Pulido), el segundo mayor es el glaciar Tronquitos con 2,78 km² (cuenca del río Manflas) y el tercer mayor glaciar es el Maranceles Este con 2,63 km² (cuenca del río Pulido).

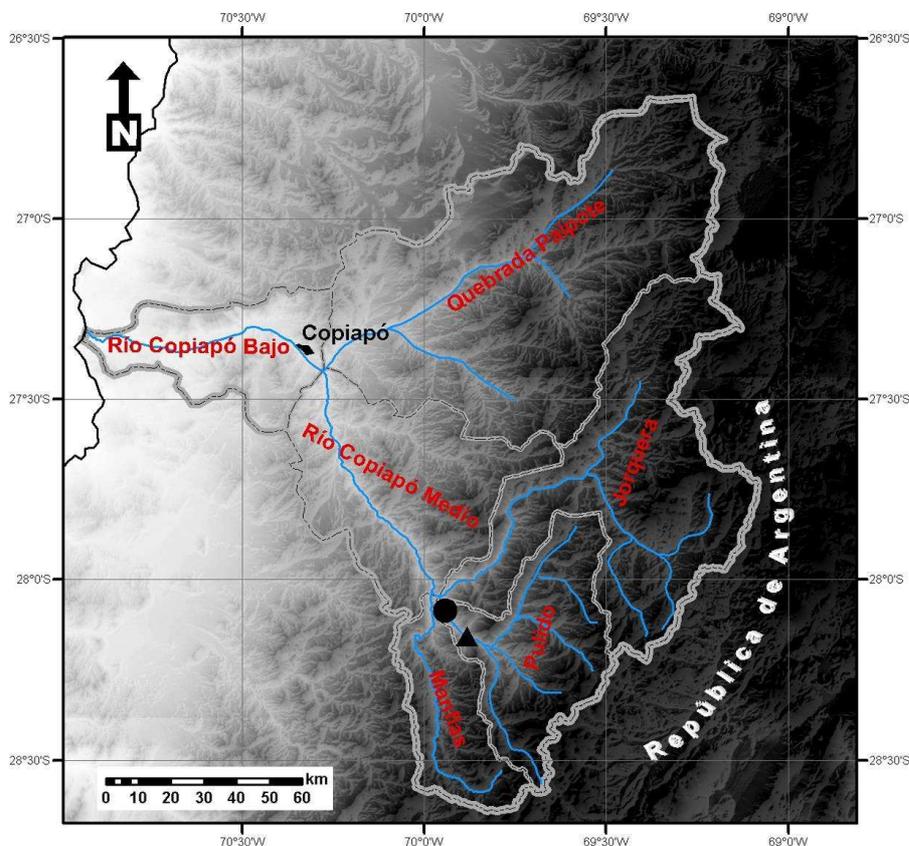


Figura 2.26. Cuenca del río Copiapó con indicación de los principales ríos tributarios. Se muestra la extensión de la cuenca del río Pulido. El círculo negro es la estación fluiométrica río Pulido en Vertedero, y el triángulo negro es la estación meteorológica Iglesia Colorada. La imagen de fondo corresponde al modelo digital de terreno SRTM.

La cuenca del río Pulido tiene un área glaciara de 14,37 km² distribuida en 44 cuerpos de hielo (Figura 2.27), estimada a partir de la imagen Aster del 12 de marzo de 2002 (Vivero, 2008). La estación fluviométrica más cercana a los glaciares del río Pulido es el Río Pulido en Vertedero, 28°05'S, 69°56'W, cota 1.310 m s.n.m., con registro de caudales desde 1964. El área de la cuenca del río Pulido aguas arriba de la estación Río Pulido en Vertedero es de 2.022,8 km², con un % de área glaciara de 0,7%. Basado en la pequeña proporción de área glaciara en la cuenca se puede suponer a priori que la influencia de la escorrentía glaciara en el Río Pulido en Vertedero es menor a aquellas en las estaciones fluviométricas consideradas en las otras dos cuencas incorporadas en este estudio (Echaurren Norte, 11,6% área glaciara y Nef, 17,3% área glaciara).

En la cuenca del río Pulido existe una estación meteorológica denominada Iglesia Colorada, 28°09'26''S, 69°52'51''W, ubicada a una altitud de 1.549 m s.n.m., con registro de datos desde 1988.

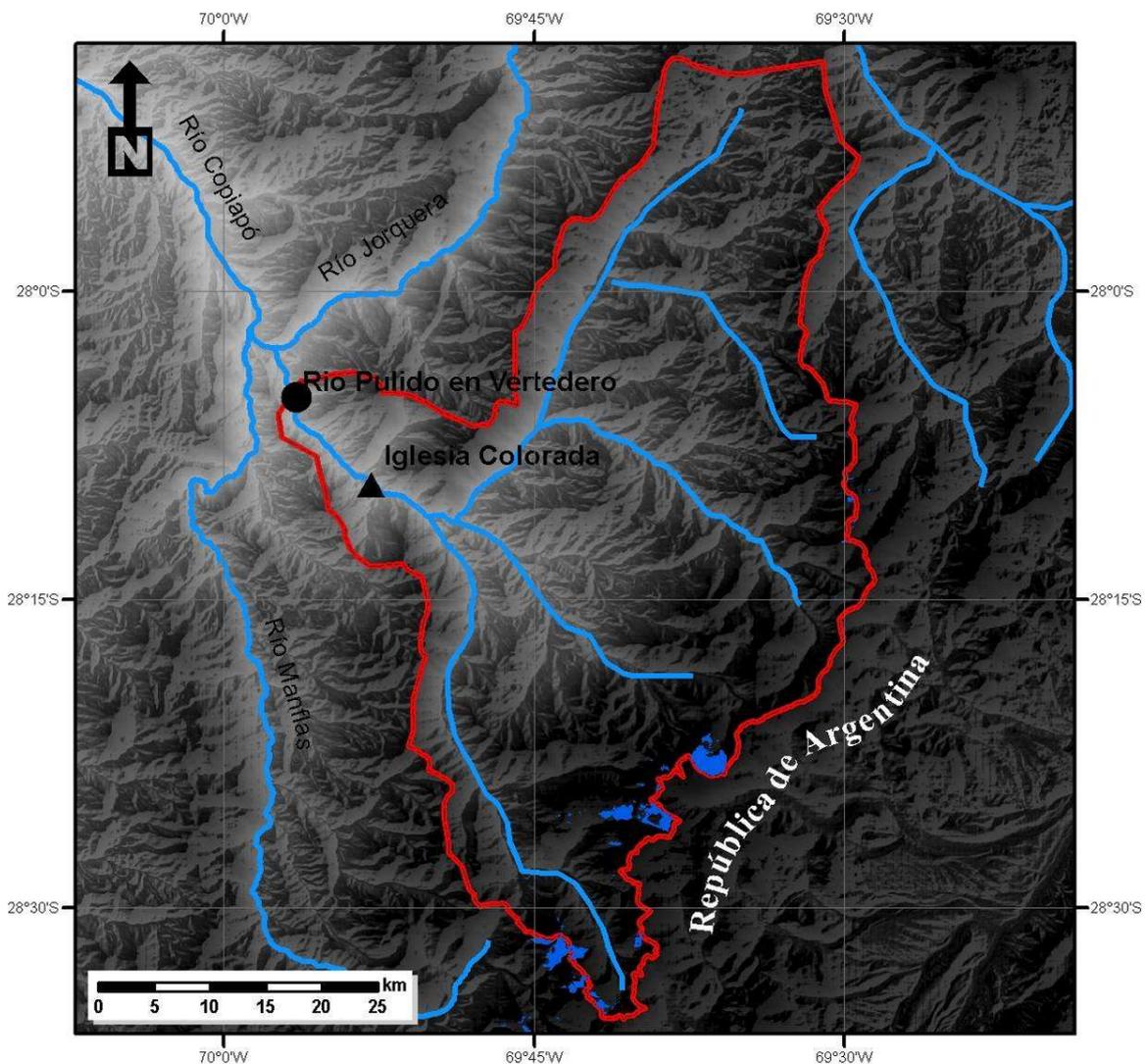


Figura 2.27. Cuenca del río Pulido. El círculo negro es la estación fluviométrica río Pulido en Vertedero, y el triángulo negro es la estación meteorológica Iglesia Colorada. La imagen de fondo corresponde al modelo digital de terreno SRTM.

2.4.2. Resultados

2.4.2.1. Simulación de caudal para el período 1993 - 2008

El caudal de la cuenca del río Pulido fue simulado utilizando el mismo modelo aplicado para la cuencas Echaurren Norte y Nef descrito en las secciones 2.1, 2.2 y 2.3 del presente informe, con un intervalo de tiempo mensual.

La altura de la línea de equilibrio considerada es de 5.500 m s.n.m. que corresponde a la línea de nieves de la imagen Aster del 12 de marzo de 2002, lo cual fue confirmado con otra imagen Aster del 24 de febrero de 2002 (Sebastián Vivero, comunicación personal). Los distintos factores y parametrizaciones iniciales del modelo se muestran en la Tabla 2.10.

Tabla 2.10. Parámetros iniciales de calibración aplicados en la cuenca del río Pulido.

K_{Hielo}	0,5
k_{Nieve}	0,5
Y	0,5
X	0,5
K_{Lento}	0,5
$A_{\text{Hielo (sucio)}}$	8,1
$A_{\text{Hielo (limpio)}}$	7,4
$A_{\text{Nieve (sucia)}}$	6,4
$A_{\text{Nieve (limpia)}}$	5,9

Los caudales simulados con los parámetros iniciales de la Tabla 2.10 eran muy diferentes a los caudales observados. Luego de varios experimentos con distinta configuración de parámetros se llegó con los valores mostrados en la Tabla 2.11 a una simulación relativamente adecuada en comparación con los caudales históricos (Figura 2.28).

Tabla 2.11. Parámetros finales de calibración aplicados en la cuenca del río Pulido.

K_{Hielo}	15
k_{Nieve}	15
Y	0,5
X	0,5
K_{Lento}	0,006
$A_{\text{Hielo (sucio)}}$	7,4
$A_{\text{Hielo (limpio)}}$	3,9
$A_{\text{Nieve (sucia)}}$	3,1
$A_{\text{Nieve (limpia)}}$	2,1

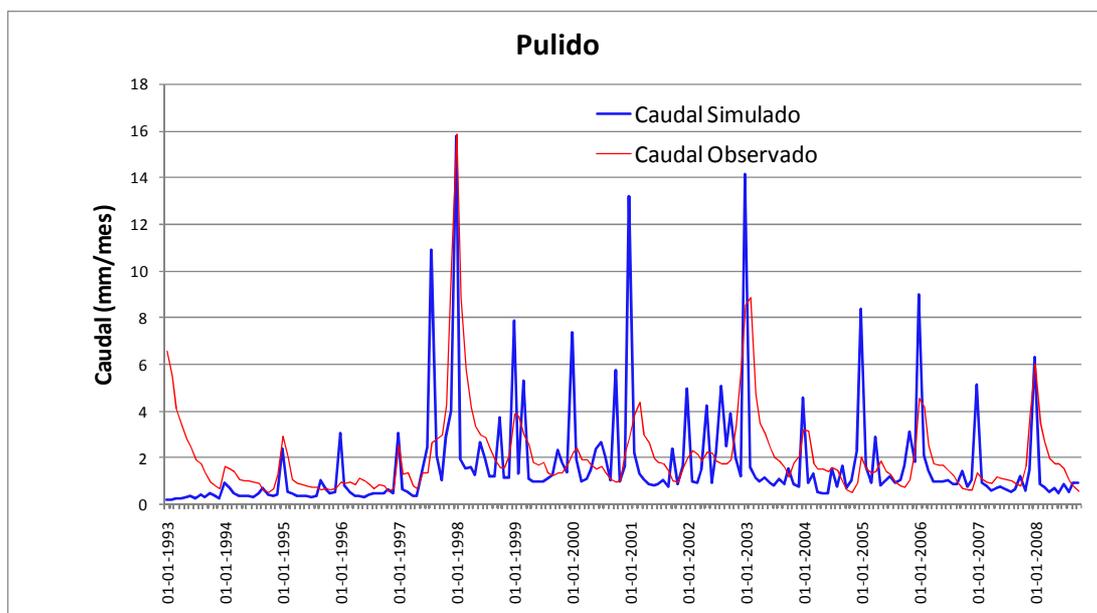


Figura 2.28. Caudal total y caudal proveniente del hielo simulado para el periodo 1993–2008 donde existe disponibilidad de datos hidrológicos y meteorológicos.

2.4.2.2. Proyección del caudal de acuerdo a escenarios futuros de cambio climático

A partir del informe del Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile (DGF, 2006) se obtuvieron las proyecciones climáticas futuras para la cuenca del Pulido según se presenta en la Tabla 2.12. El DGF utilizó el modelo regional de meso-escala PRECIS (Providing Regional Climates for Impact Studies) desarrollado por la Oficina Meteorológica del Reino Unido, con resolución espacial de 25 km, forzado mediante el modelo de circulación general HadCM3 (Hadley Center Climate Model, version 3). La temperatura indica el aumento en °C de la temperatura proyectada a hacia fines del presente siglo (2071-2100) con respecto al clima actual (1961-1990). La precipitación (pp) indica el cambio futuro proyectado para 2071-2100 expresado en % de la precipitación actual (1961-1990). DEF: Diciembre, Enero, Febrero; MAM: Marzo, Abril, Mayo; JJA: Junio, Julio, Agosto; SON: Septiembre, Octubre, Noviembre. ANUAL representa los promedios anuales de cambios de temperatura y precipitación, aproximados cada 0,5°C y cada 5% de precipitación.

Tabla 2.12. Cambios climáticos futuros calculados por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile para los escenarios A2 y B2 (DGF, 2006) para el período 2071-2100 para la cuenca del río Pulido.

Escenario	Estación	T°C	pp%
A2	DEF	4-5	25-50
A2	MAM	4-5	100
A2	JJA	4-5	120-130
A2	SON	4-5	120-130
A2	ANUAL	4.5	100
B2	DEF	3-4	80-90
B2	MAM	2-3	130-150
B2	JJA	3-4	120-130
B2	SON	3-4	70-80
B2	ANUAL	3,0	105

Los caudales simulados para los escenarios futuros de cambio climático se observan en la Figura 2.29, Figura 2.30, Figura 2.31 y Figura 2.32. En el escenario A2 el aumento de temperatura para fin de siglo es de 4,5°C, con una precipitación que se mantiene igual al presente. En el escenario B2 el aumento de temperatura para fin de siglo es de 3°C, con una precipitación ligeramente superior (5%) a la precipitación actual (Tabla 2.12).

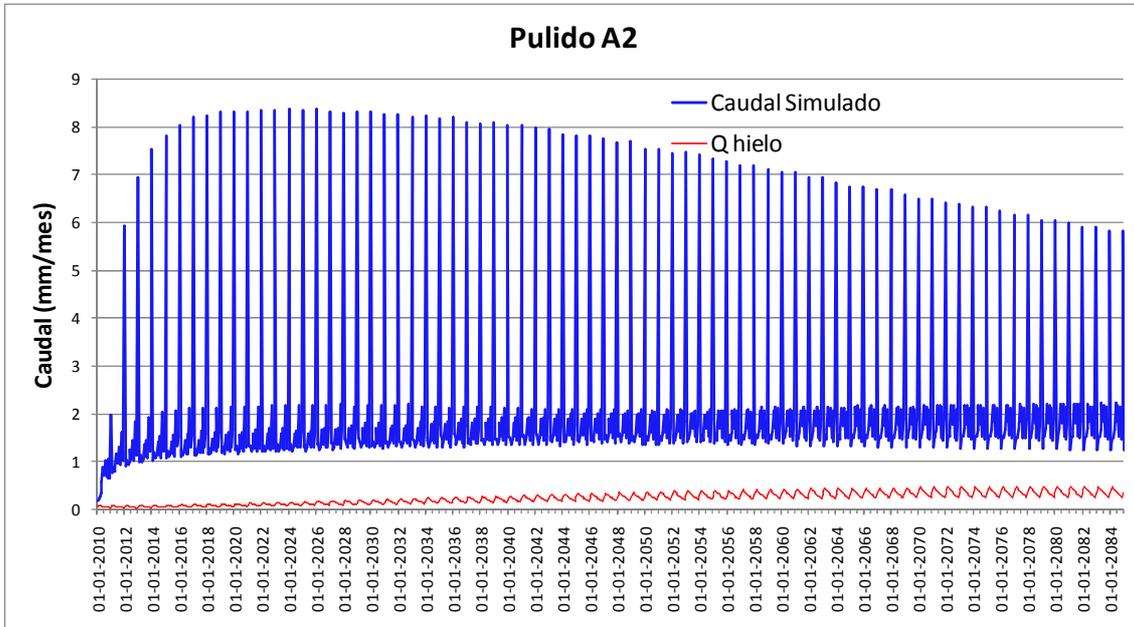


Figura 2.29. Caudal total y caudal proveniente del hielo simulado para el periodo 2010–2085 según el escenario de cambio climático A2.

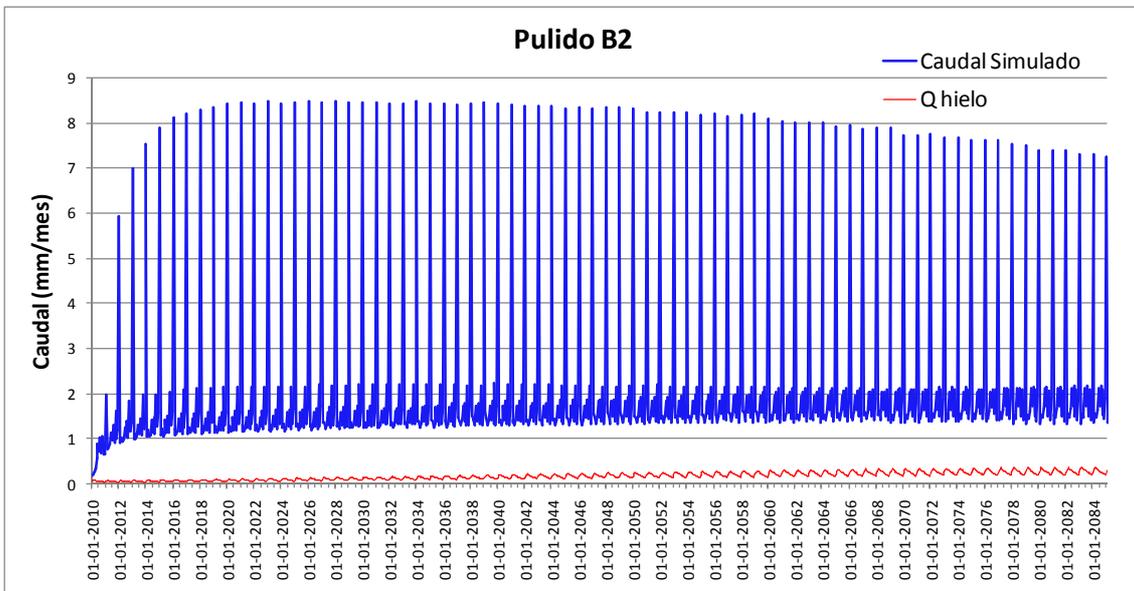


Figura 2.30. Caudal total y caudal proveniente del hielo simulado para el periodo 2010–2085 según el escenario de cambio climático B2.

Como resultado se observa en la Figura 2.29 y Figura 2.30 un fenómeno interesante: un aumento inicial de los caudales totales (hasta el año 2020 en ambos escenarios) y luego una disminución de los caudales máximos junto a

un aumento de los caudales mínimos. En las mismas Figuras 2.29 y 2.30 se observa un aumento de los caudales de hielo desde 2010 a 2085. Esto se puede explicar debido al aumento futuro de la temperatura. Los glaciares de la cuenca del Pulido disminuyen de 14,37 km² a 8,5 km² (41%) en el período 2010-2085 en el escenario A2, y de 14,37 km² a 10,1 km² (30%) en el escenario B2 (Figura 2.31 y Figura 2.32, respectivamente).

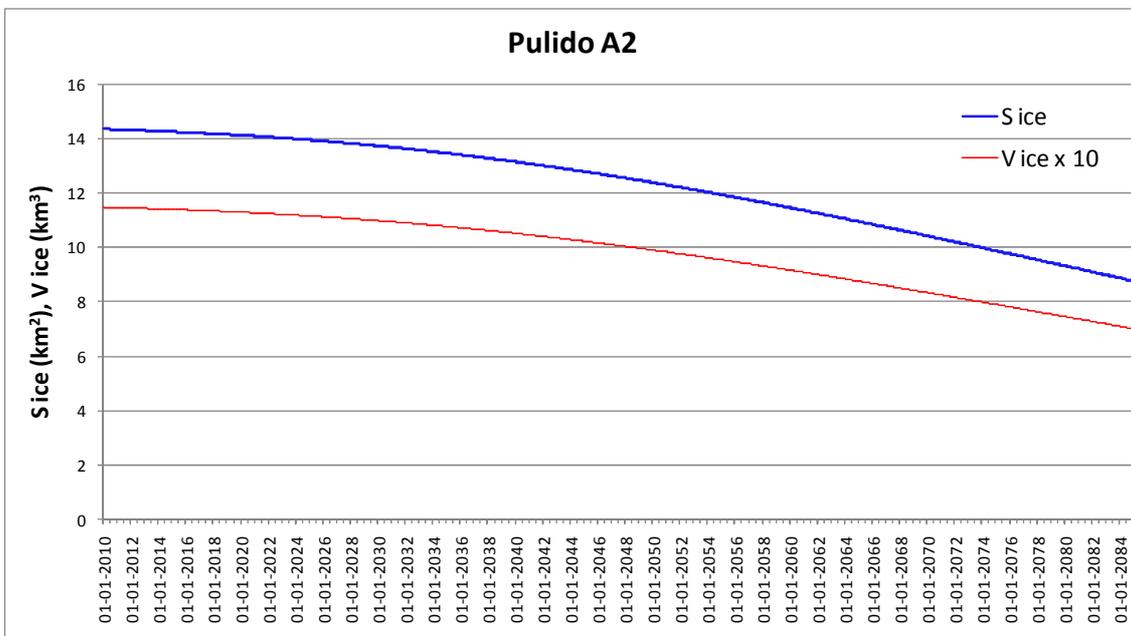


Figura 2.31. Variación de la superficie (Sice, azul) y el volumen (Vice, rojo) de los glaciares de la cuenca del río Pulido en el escenario futuro A2 de cambio climático.

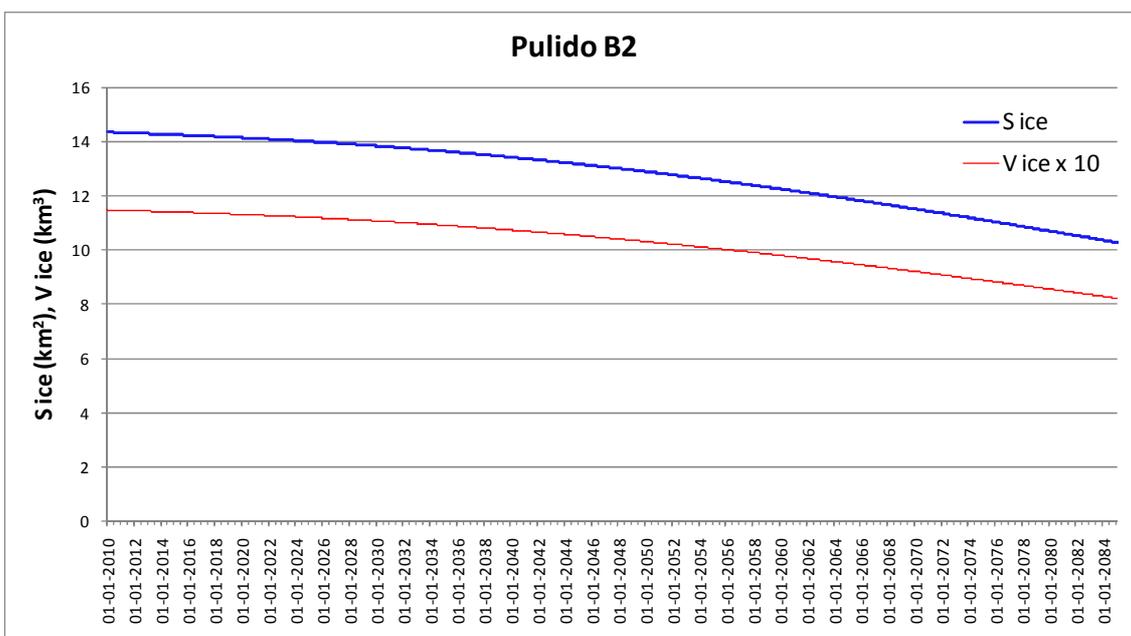


Figura 2.32. Variación de la superficie (Sice, azul) y el volumen (Vice, rojo) de los glaciares de la cuenca del río Pulido en el escenario futuro B2 de cambio climático.

Con el fin de proyectar la evolución de la superficie y del volumen glaciar de la cuenca bajo escenarios de cambio climático, se consideró un espesor de hielo inicial para el año 2010 de 80 m. El espesor inicial fue calculado tomando en cuenta tanto el área glaciar total de la cuenca como el volumen glaciar total. De acuerdo a la Ecuación 2.26:

$$E = \sum_1^n V \div \sum_1^n S \quad (\text{Ecuación 2.26})$$

Donde:

E: corresponde al espesor (m); *n*: número total de glaciares de la cuenca (44); *V*: volumen de cada glaciar el cual fue estimado en base al espesor obtenido a través de una relación empírica de Marangunic (1979) para los glaciares del Cajón del Maipo (m³); *S*: es la superficie glaciar de cada glaciar medida por Vivero (2009) (m²).

De acuerdo a la Ecuación 2.26, el espesor de hielo inicial resulta en un valor promedio de 71 m para el conjunto de los 44 glaciares existentes en la cuenca del río Pulido, los que totalizan un área de 14,37 km² (Vivero, 2009) y que en su mayoría presentan superficies inferiores a los 0,1 km². Si bien el número de glaciares grandes (área mayor a 2 km²) constituye una minoría, su superficie relativa es sustancialmente mayor a la del conjunto masivo de glaciares pequeños, por lo cual el espesor de 71 m es considerado bajo y poco representativo. Para ilustrar esta situación se puede mencionar que de acuerdo a la Ecuación 2.26, los 4 glaciares más grandes de la cuenca (Maranceles, Maranceles Este, Del Potro y Los Cuyanos) resultan con un espesor de 87 m, cuya superficie total es de 11 km² y que corresponde al 76 % del área total de la cuenca. En consecuencia, se ha adoptado un espesor de 80 m, el que corresponde a un valor intermedio que de esa manera incorpora tanto el promedio estadístico original como la importancia relativa de los glaciares grandes.

Se observa que tanto el área de los glaciares como el volumen disminuye aproximadamente un 40(30)% hacia el año 2085 con respecto a 2010 en el escenario A2(B2).

2.5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El caudal de las cuencas hidrológicas Pulido, Echaurren y Nef localizadas en el norte, centro y sur de Chile, respectivamente, fue simulado aplicando un modelo glacio-hidrológico de tipo conceptual. Para la aplicación de dicho modelo, las cuencas fueron divididas espacialmente en área glaciar y área no glaciar. Ambas zonas de la cuenca fueron procesadas en forma independiente, puesto que en ellas se observan procesos hidrológicos de distinta naturaleza. Las variables de entrada del modelo corresponden a la precipitación y a la temperatura. Con el fin de representar mejor la variación espacial de las variables de entrada, la cuenca fue dividida en bandas de elevación.

Los resultados obtenidos difieren entre cada una de las cuencas. Se puede mencionar que, de acuerdo al coeficiente de determinación calculado, el mejor

resultado corresponde al obtenido para la cuenca del río Nef ($R^2=0,6$). Para las cuencas del Pulido y Echaurren los caudales simulados se pudieron ajustar de manera razonable a los caudales observados, aunque las correlaciones son más pobres.

Las zonas geográficas y características de cada una de las tres cuencas son muy disímiles, al igual que las superficies totales y sus respectivos porcentajes de superficie glaciar. En el caso de la cuenca del río Pulido (2.038 km²) por ejemplo, que corresponde a la cuenca más grande de las tres estudiadas y con el menor porcentaje de superficie glaciar (0,7%), son a priori más relevantes los procesos hidrológicos de la zona no-glaciar.

Otro aspecto importante de destacar es que los resultados obtenidos están directamente relacionados con la calidad de los datos de entrada del modelo. Una característica común para las tres cuencas estudiadas es que se dispuso de series de datos de precipitación, temperatura y caudal que presentaban lagunas. Además, en cada cuenca se dispuso de solamente una estación meteorológica con una estadística de longitud adecuada de precipitación y temperatura; estaciones que incluso están bastante alejadas de los glaciares. Por consiguiente, no fue posible tener una buena precisión en la determinación de los gradientes de ambas variables y, especialmente, en la distribución espacial de la precipitación.

También se debe mencionar la falta de conocimiento de las zonas glaciares de las cuencas y especialmente en las zonas altas de acumulación. En ese sentido, la cuenca que posee más información es la cuenca de Echaurren donde se ha monitoreado el balance de masa desde el año 1975.

Uno de los aspectos más complejos de resolver que se presenta en el modelamiento hidrológico de cuencas glaciares es representar por separado los distintos aportes que intervienen en el régimen hidrológico de la cuenca. Al respecto, se puede mencionar que con el modelo hidrológico aplicado es posible diferenciar los aportes de la cuenca gracias a la aplicación del enfoque de reservorios lineales paralelos. Lo anterior corresponde a uno de los resultados más interesantes obtenidos con el modelo aplicado. La estimación del aporte de los glaciares (Qhielo) al escurrimiento total en cada una de las tres cuencas es un buen ejemplo. Para el glaciar Echaurren Norte, que tiene una cuenca total de 3,98 km² y un área englacada de 0,46 km² (11,6%), el aporte glacial promedio a nivel anual es en promedio de 17%. Para el Nef, que tiene una cuenca total de 800 km² (en la confluencia con el río Baker) y un área englacada de 138 km² (17,3 %), el aporte glacial a nivel anual es en promedio de 40%. Para el Pulido, que tiene una cuenca total de 2.022,8 km² y un área englacada de 14,37 km² (0,7 %), el aporte glacial a nivel anual es casi nulo. Por cierto, en época de estiaje el aporte glaciar al escurrimiento total se torna mucho más relevante, para cada una de las cuencas.

A pesar de que los resultados de la simulación de caudal no hayan sido completamente satisfactorios, se realizó el ejercicio de estimación de la evolución de los caudales y de los glaciares en futuros escenarios de cambio climático. Para la cuenca del Echaurren Norte se observa una disminución del caudal total y del caudal de hielo (Qhielo) debido sin duda a la disminución de las precipitaciones y a que este pequeño glaciar comienza a desaparecer para

ambos escenarios A2 y B2 (Figura 2.8 y Figura 2.9). Qhuelo de hecho se torna prácticamente nulo a partir del año 2030 en ambos escenarios. En el escenario A2 el glaciar Echaurren Norte desaparece el año 2040 (Figura 2.10) y en el escenario B2 el glaciar Echaurren Norte desaparece el año 2046 (Figura 2.11).

Para el glaciar Nef se observa una disminución del caudal tanto para el escenario A2 (Figura 2.22) y B2 (Figura 2.23), debido a las menores precipitaciones proyectadas. Se observa asimismo una disminución del aporte por derretimiento de hielo, que no es intuitivo pues un glaciar del tamaño del Nef se espera que al aumentar la temperatura pueda derretir más hielo y por ende estar en condiciones de contribuir más a la escorrentía. El glaciar Nef disminuye de 138 km² el año 2010 a 84 km² el año 2085 en el escenario A2 (Figura 2.24), y a 86 km² el año 2085 en el escenario B2 (Figura 2.25).

Para la cuenca del Pulido se observa un aumento inicial de los caudales totales hasta el año 2020 en ambos escenarios y luego una disminución de los caudales máximos junto a un aumento de los caudales mínimos. En cuanto a los Qhuelo (Figura 2.29 y Figura 2.30) se observa un aumento desde 2010 a 2085. Esto sugiere que frente al aumento futuro de la temperatura los glaciares de la cuenca del Pulido, que disminuyen de 14,37 km² a 8,5 km² (41%) en el período 2010-2085 en el escenario A2, y de 14,37 km² a 10,1 km² (30%) en el escenario B2 (Figura 2.31 y Figura 2.32), entregarán paulatinamente más agua. Esto sin duda no es sustentable en el tiempo, pero de acuerdo al modelo al menos perdura hasta el año 2085.

Se recomienda a futuro profundizar este estudio de modelamiento en cuencas piloto que se puedan equipar para obtener datos medidos en terreno tanto para la zona glacial (factores grado-día por ejemplo) como para la zona libre de glaciares (factores de almacenamiento, infiltración, etc.). Lo anterior permitiría calibrar en forma óptima el modelo así como incluir otros módulos.

En el caso de que se disponga de datos lo suficientemente precisos y bien distribuidos en la cuenca se podría mejorar la resolución espacial del modelo procesando los datos a la escala del pixel. Esto permitiría incorporar por ejemplo, la exposición del terreno en adición a la elevación, mediante un Modelo Digital de Terreno basado en píxeles. Por ejemplo, el modelo de ablación (grado día) podría mejorar sustancialmente si se aplica un modelo donde la energía de onda corta recibida depende de la exposición del terreno. Otra modificación interesante sería incorporar la dinámica del hielo que actualmente no está representada.

3. ANEXO: Monitoreo de glaciares piloto

3.1. ELECCIÓN DE GLACIARES PILOTO: GLACIARES UNIVERSIDAD Y MOCHO (FIGURA 3.1)

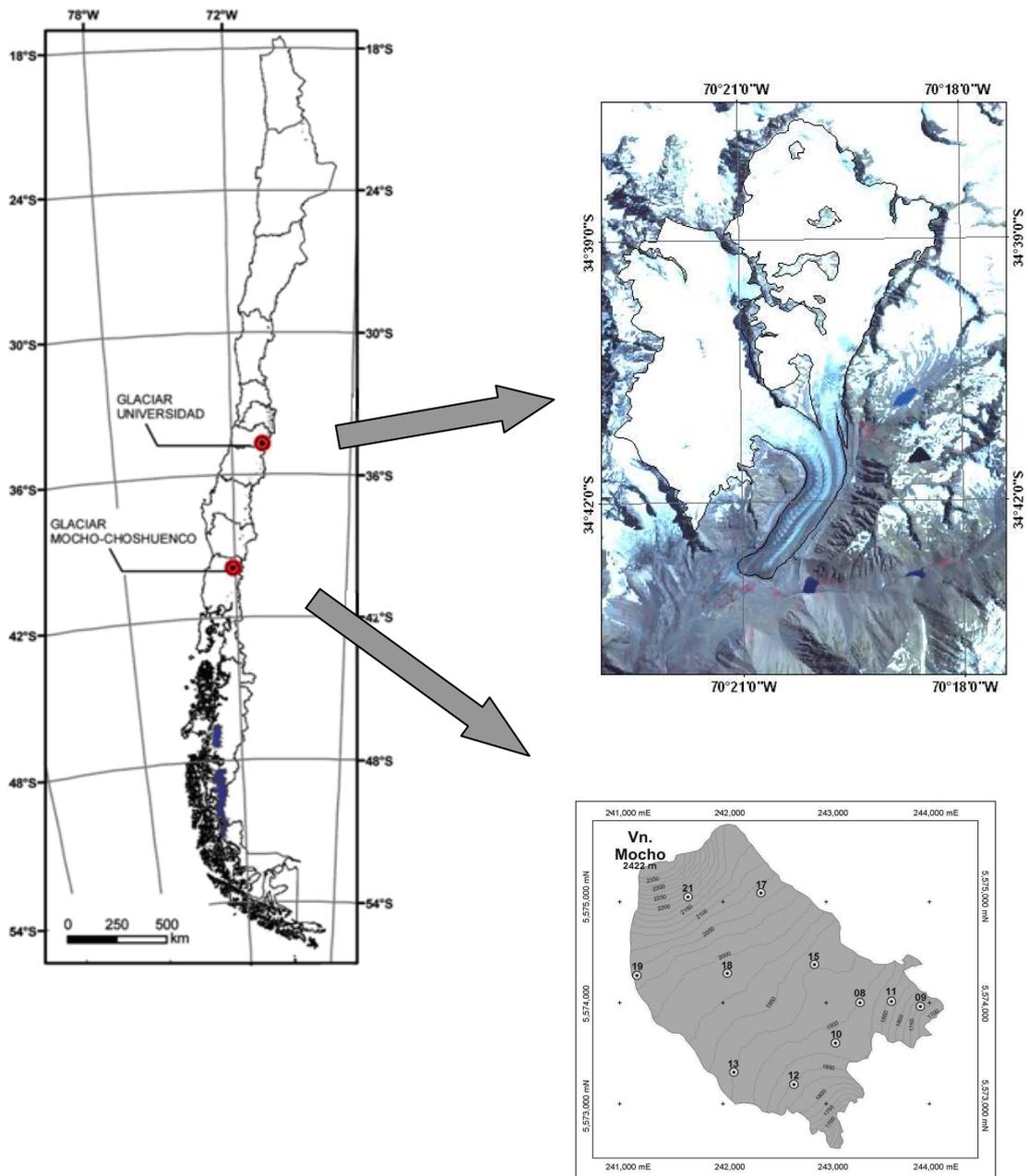


Figura 3.1. Localización de áreas de monitoreo piloto.

3.1.1. Glaciar Universidad, valle del río Tinguiririca, Región de O'Higgins

Personal del CECS acompañados del inspector fiscal del proyecto, el ingeniero Fernando Escobar Cáceres, realizaron el día 22 de Octubre de 2008 un sobrevuelo de 2 1/2 horas a bordo de un helicóptero provisto por una empresa privada a los glaciares ubicados en las cabeceras de dos importantes cuencas hidrológicas de la Región de O'Higgins. Varias operaciones de aterrizaje fueron realizadas para visitar los glaciares Cipreses (34°33'S, 70°22'W), en las nacientes del Río Portillo, afluente del río Cachapoal, y Universidad (34°42'S, 70°20'W), en las nacientes de l río San Andrés, cuenca del río Tinguiririca, pudiendo comprobarse las condiciones locales para la selección definitiva de un área piloto en esta zona del país.

El sobrevuelo contempló la exploración de los glaciares y alrededores, incluyendo las zonas de acumulación, la lengua terminal y el área periglaciár, aterrizando en algunos puntos de interés para la instalación del instrumental.

El glaciar Cipreses debió descartarse porque justo antes del acceder al frente del glaciar, hay una cascada de rocas de más de 300 m de altura, que requiere ser sorteada con una escalada difícil de llevarse a cabo con equipos e instrumentos. Además, esta cascada o salto, está ubicado a más de 2 días de caminata desde el lugar donde pueden dejarse vehículos.

El glaciar Universidad presenta un registro importante de variaciones, con algunos avances durante la primera mitad del siglo XX junto a otros tres glaciares (Juncal Sur, Museo y Colina en la cuenca del Maipo) en sentido opuesto a la tendencia general de retroceso en la región central del país (Rivera *et al.*, 2000).

Este glaciar presenta óptimas condiciones de accesibilidad debido a la existencia de un camino que llega hasta 10 km aguas abajo de su frente, de propiedad de la Sociedad Agrícola Los Maitenes, donde se está desarrollando el proyecto hidroeléctrico San Andrés.

La topografía del terreno es suave, la altitud del glaciar se distribuye entre los 2.463 m s.n.m. en el frente y los 4.478 m s.n.m. en la cabecera. Su longitud alcanza los 10,9 km con una predominancia en la exposición sur. A la fecha del sobrevuelo (fines de primavera) no se avistaron grandes campos de grietas que pudieran poner en riesgo al personal, En general las grietas durante la realización de los terrenos se encontraban descubiertas lo que permitió el tránsito por el frente y las zonas aledañas a pie, sin embargo el acceso a las partes altas del glaciar se realizó con el apoyo de helicópteros.

La selección de este glaciar se justifica plenamente, pues representa las condiciones propias de una cuenca de Chile Central, donde la competencia por la adquisición y exploración de nuevos recursos hídricos es muy acuciante y donde el glaciar probablemente juega un rol gravitante. Este rol es actualmente desconocido, puesto que la red de medición hidrometeorológica existente en el Tinguiririca no contempla mediciones en altura y menos en zonas glaciares. La competencia por recursos en el área es tal, que asociaciones de canalistas de las comunas de San Fernando, San Vicente de Tagua Tagua y aledañas, han

manifestado su preocupación por los glaciares del Tinguiririca y la falta de estudios de detalle (Graciela Correa, Gerente Asociación de Canalistas Pedro Aguirre Cerda, El Tambo, comunicación personal, Enero, 2009).

El tamaño del glaciar ($31,8\pm 0,8 \text{ km}^2$) y el que posea una zona de alimentación compuesta por dos importantes cuencas (Figura 3.2) son puntos a favor de esta selección. Como se planteó anteriormente, en Chile Central ya existe un programa de monitoreo de un glaciar pequeño (Echaurren Norte) y uno en un glaciar mediano (Juncal Norte), por lo que faltaría en forma urgente un glaciar grande como el Universidad.

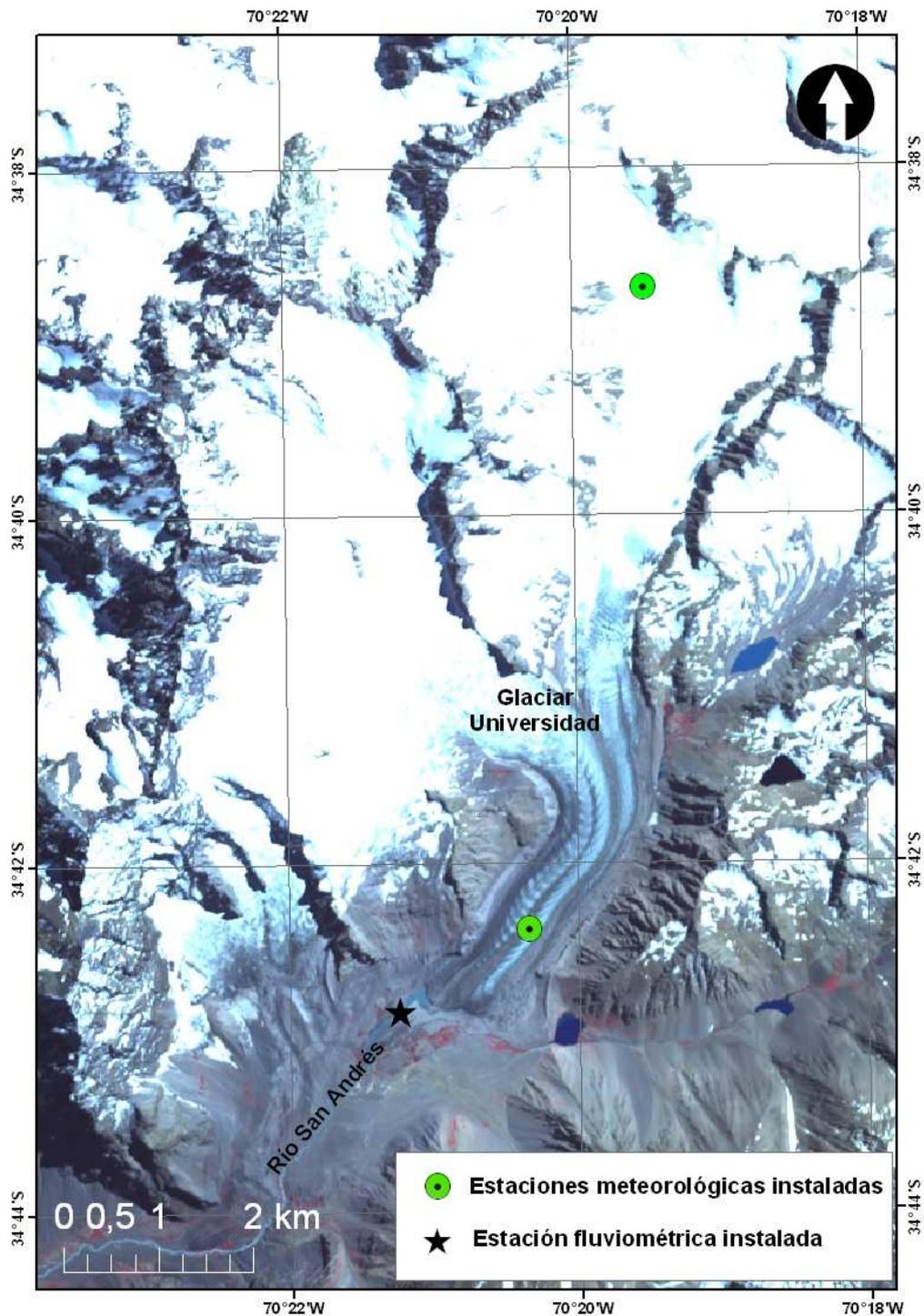


Figura 3.2. Imagen satelital ASTER mostrando la ubicación de las estaciones meteorológicas y fluviométrica

En términos de los controles topográficos, este glaciar también es una buena opción, porque su frente no presenta condiciones desprendentes, su recubrimiento terminal permite estudiar condiciones comunes en glaciares recubiertos existentes en la zona y su lengua bien definida, permitirá evaluaciones precisas de fluctuaciones volumétricas. Este glaciar además presenta dos zonas de acumulación de grandes dimensiones y características relativamente planas, donde es posible instalar instrumentos y balizas.

El acceso a este glaciar es uno de sus puntos más favorables, puesto que desde el lugar donde se puede llegar en vehículo, sólo se requieren pocas horas de caminata (3-4) para llegar al frente del glaciar, para lo cual hay que subir una pendiente suave. En la zona existen servicios provistos por arrieros locales para el transporte de personal e instrumentos hasta el glaciar.

Finalmente, desde el punto de vista administrativo y legal, hasta ahora todas las conversaciones y comunicaciones establecidas con la empresa propietaria del terreno donde se ubica el glaciar Universidad, han sido muy exitosas. Hasta ahora, la empresa ha autorizado por escrito el acceso de personal CECS que trabajará sobre el glaciar. De igual forma, la empresa autorizó primero en forma verbal la instalación de estaciones meteorológicas y fluviométricas para la realización de este estudio. En la actualidad la DGA obtuvo los permisos legales para construir la estación fluviométrica.

3.1.2. Reforzamiento de programa existente de monitoreo: Glaciar del Mocho, Volcán Mocho Choshuenco, Región de los Ríos

La mayoría de los glaciares de la Región de Los Ríos han retrocedido y adelgazado en las décadas recientes (Rivera *et al.*, 2002). Dichos glaciares se localizan, en su mayoría, en conos volcánicos, de los cuales uno de los más importantes es el Volcán Mocho-Choshuenco (39°55'S, 72°02'O). El Volcán Mocho-Choshuenco es un volcán activo que tuvo su última erupción el año 1864 (Echegaray, 2005) y a partir de esa fecha se ha considerado como un volcán 'durmiente'.

Una de las principales características de la interacción glacio-volcánica corresponde a que los glaciares ubicados sobre un volcán, están frecuentemente cubiertos con ceniza volcánica y flujos de lava que provocan una reducción del área glaciar. Al mismo tiempo, las capas de depósitos volcánicos sobre el glaciar producen un aislamiento del hielo protegiéndolo de la radiación solar y, por lo tanto, dejándolo menos expuesto a procesos de ablación (Lliboutry, 1956). No obstante lo anterior, los glaciares de la Región de los Ríos han presentado un retroceso y adelgazamiento sostenido. La principal hipótesis que se ha manejado hasta hoy para explicar dicha reducción de masa glaciar es que las tendencias negativas de precipitación que se han registrado en la región han provocado una disminución de acumulación de nieve. A modo de referencia, entre el año 1993 y el año 2000 se ha observado una reducción máxima de la precipitación en la región (alrededor de los 39° S) de 450 mm en los últimos 70 años (Quintana, 2004). Adicionalmente, el aumento de temperatura registrado en la atmósfera media de la Región de Los Ríos,

también ha contribuido a la reducción de las superficies glaciares antes mencionadas (Rivera *et al.*, 2006b).

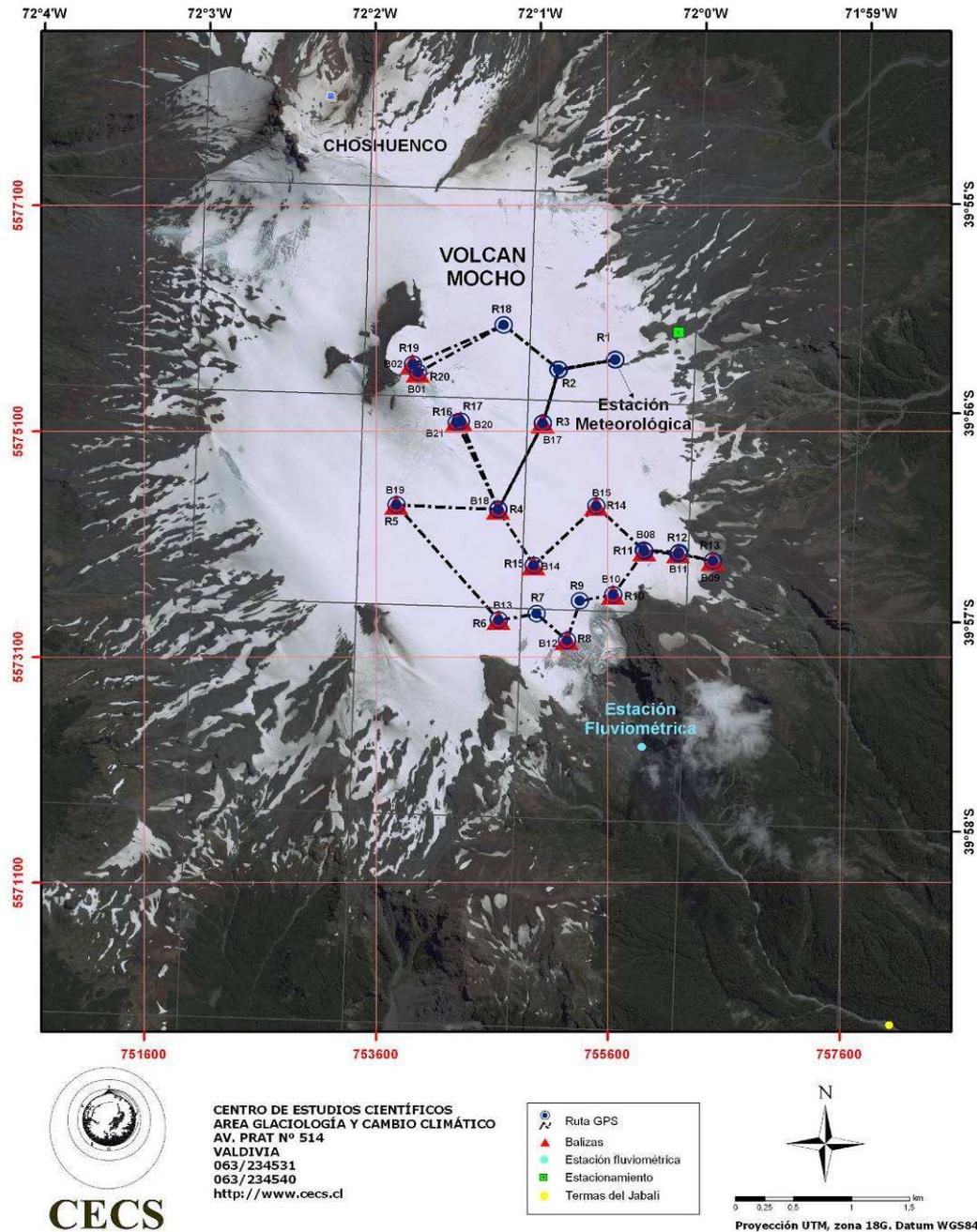


Figura 3.3. Red de monitoreo instalada por el CECS en el Volcán Mocho. En la figura se expone la localización de las balizas, la estación meteorológica y el lugar donde se instaló la estación hidrológica del CECS que finalmente falló.

Con el propósito de verificar dicha hipótesis y de comprender mejor las interacciones glacio-climáticas de las zonas volcánicas del sur de Chile, el CECS comenzó en Mayo del año 2003 un programa de monitoreo en el Glaciar Mocho (4,8 km²) localizado en el área Sur-Este del volcán del mismo nombre (Rivera *et al.*, 2005; Rivera *et al.*, 2006b; Bown *et al.*, 2007). Este glaciar presenta registros de retroceso de su frente entre el año 1976 y 2005 lo que se ha traducido en una pérdida del 17% de su área original (Rivera *et al.*, 2006b). El espesor promedio, medido con radio eco sondaje fue determinado en 138±9

m con un máximo espesor de hielo que llega a 270 m (Rivera *et al.*, 2006b). El sistema de monitoreo instalado por el CECS (Figura 3.3) consiste en una red de 18 balizas para el cálculo de balance de masa, una estación meteorológica (instalada cercana a la altitud de la línea de equilibrio, estimada en 1.956 m s.n.m.) y una estación hidrológica (instalada el año 2005) que lamentablemente se destruyó producto de las condiciones topográficas extremas donde se ubicaba y también debido al importante caudal proveniente del Río Mocho. Además este glaciar ha sido visitado frecuentemente para realizar prospecciones geofísicas y glaciológicas.

El glaciar se encuentra ubicado dentro de los terrenos del Fundo privado Huilo Huilo, para lo cual existe una colaboración de largo tiempo con su administración. Además de la autorización para acceder al glaciar, se cuenta con el apoyo en logística del personal y en transporte mediante el traslado en tractores “Pisten Bully” hacia y desde la zona de acumulación para el personal del CECS.

Se ha considerado en el proyecto de Estrategia Nacional de Glaciares, reforzar el actual monitoreo del Glaciar Mocho, con el objetivo de dar continuidad a los trabajos realizados y así sumar este glaciar al Echaurren Norte, el único balance de masa de largo plazo que se hace en Chile.

De igual forma, las mediciones hidrológicas permanentes se han realizado en muy pocas cuencas glaciares del país, por lo que la instalación de una estación en el Glaciar Mocho es también de alta importancia. Los datos que aportará la estación hidrológica permitirán calcular el balance hídrico del Río Mocho, permitiendo así estudiar con mayor precisión el derretimiento glaciar. Por otro lado, el estudio combinado del balance de masa y del balance hídrico aportarán los elementos necesarios para realizar un modelamiento hidrológico para evaluar la disponibilidad de los recursos hídricos originados en el Glaciar Mocho.

3.2. ENFOQUE METODOLÓGICO A SER APLICADO EN LA IMPLEMENTACIÓN DEL GLACIAR PILOTO

Las tres líneas principales de trabajo serán los balances de energía, de masa e hídricos. Los que son piezas fundamentales para el diseño, alimentación y validación de modelos integrados que permitan entender y predecir el comportamiento de los glaciares en diversos escenarios climáticos, incluyendo las variaciones de sus efectos sobre el sistema hidrológico.

Las metodologías, técnicas e instrumentos utilizados son los indicados en el capítulo de la red nacional de monitoreo, los que serán probados y mejorados de ser necesario en base a la experiencia ganada en los glaciares piloto.

Las variables a medir en las zonas de ablación y acumulación del glaciar son principalmente el balance de energía y el balance de masa, mientras que aguas abajo se medirá el caudal de escorrentía proveniente del glaciar. El equipamiento instrumental para este programa piloto entonces, lo conforman dos herramientas de medición: estaciones meteorológicas automáticas y estaciones de aforo hidrológico. A ello se suma la instalación de una red de

balizas, la realización de mediciones con GPS geodésicos, la realización de mediciones con radio eco sondaje, entre otras actividades que complementan la realización del monitoreo glaciar.

La Estación Meteorológica Automática, AWS (por sus siglas en inglés Automatic Weather Station) permite la determinación de todos los parámetros necesarios para calcular el balance energético de un glaciar.

El objetivo por lo tanto, fue equipar dos AWS en la superficie del glaciar, cada una compuesta de un anemómetro con veleta, sensor de temperatura y humedad ambiental, radiómetro neto que mide todos los flujos radiativos, barómetro, pluviómetro, y un sensor sónico para determinar la altura de la nieve. En el caso de la AWS en la zona de ablación estos sensores fueron adosados a un trípode de 3 m (excepto el pluviómetro y sensor de altura que quedaron en soportes independientes enterrados en la superficie del glaciar debido a las características de cada sensor) y conectados a un datalogger alimentado con paneles solares y baterías. Mientras que en la zona de acumulación los sensores fueron adosados a una estructura de aluminio de 8 m que se enterró en la superficie glacial 5 m. Este monitoreo es complementado con mediciones discretas de balizas, donde también se mide densidad de la nieve con el muestreador Mt. Rose, Federal. Los balances energéticos, la ablación y variables meteorológicas tales como la velocidad y dirección del viento, la presión y la precipitación, entre otros, son registrados simultáneamente y correlacionados. Debido a que los balances energéticos son muy variables en función del recubrimiento de la superficie y la altitud, es que se han instalado estas dos AWS, ambas con una configuración similar pero diferenciadas debido a que una se instaló en un sitio del glaciar mayormente cubierto por detritos, y a menor altitud. Ambas estaciones se complementarán y permitirán obtener la conductividad termal de las tefras o cenizas volcánicas (Brock *et al.*, 2007) y construir un gradiente altitudinal de balance de energía.

La estación fluviométrica tiene el objetivo de medir el caudal de agua proveniente del glaciar, siendo necesario separarlo de los aportes de la superficie no glaciar de la cuenca. Por lo tanto, la selección del sitio es un elemento crítico para su determinación. La estación que se instaló en los sitios piloto consiste de un sistema de aforo configurado con un Sistema de Adquisición de Datos, un transductor de presión para medir el nivel del agua y una regla limnimétrica, a partir de lo cual se medirá el caudal proveniente del glaciar. En el diseño preliminar discutido con los consultores Gálvez & Gálvez, se ha considerado que la elección de la sección del caudal donde se realizará la instalación sea adecuada a la naturaleza de este instrumento registrador. Por lo tanto, considerando las trazas del río en su máxima capacidad, la regla del instrumento deberá cubrir la máxima altura de la sección. En cuanto a la protección del instrumento, se instaló una caseta de hierro que se encuentra fuera de las aguas máximas, siguiendo las normas establecidas por la Dirección General de Aguas, esta caseta es de aproximadamente 50 cm (alt) x 40 cm (ancho), el que aloja el sistema de medición. La estación ha sido adquirida en Inducien Ltda., representante en Chile de la marca Stevens/KPSI. La adquisición de un molinete digital Marca Gurley modelo 622DG2N permitirá hacer mediciones puntuales de velocidades del flujo en diferentes secciones, las que pueden a futuro ser complementadas con sistemas de dilución de sal para la determinación de los caudales.

3.3. INSTRUMENTACIÓN

3.3.1. Glaciar Universidad

Se han instalado dos AWS en la superficie de este glaciar (Figura 3.2), una en la zona de ablación (Tablas 3.1 y 3.2) y otra en la zona de acumulación (Tablas 3.3 y 3.4). La primera AWS se instaló sobre la zona de ablación del glaciar, en un sector semi cubierto por material. En la zona de acumulación del glaciar a 3.626 m s.n.m, se instaló la segunda AWS en un plateau donde se observa una topografía suave y libre de grietas. Se espera que la estación sea visitada periódicamente para revisar configuraciones, sensores y bajar datos. Para la instalación de la estación fluviométrica (Tabla 3.5) se ha seleccionado un sitio a unos 300 m aguas abajo del frente del glaciar. La estación se ha instalado en este sitio ya que no evidencia riesgo de avalanchas, se observa un flujo encauzado, escasamente turbulento y en baja pendiente.

Tabla 3.1. Sensores instalados en AWS de zona de ablación del glaciar Universidad.

Sensor	Código	Marca	Datos obtenidos (intervalos de 15 minutos)
Anemómetro RM	05103	Young	Velocidad promedio y velocidad máxima del viento en km/h
Temperatura y Humedad	HMP45C-L11	Vaisala	Temperatura del aire (°C) y Presión atmosférica (mbar)
Piranómetro	CMP3-L34	Kipp and Zonen	Radiación global (W/m ²) y Total flujo de radiación (kJ/m ²)
Radiómetro neto	NR-LITE-L48	Kipp and Zonen	Radiación neta (W/m ²) y Radiación neta corregida por temperatura (W/m ²)
Pluviómetro	TE525MM-L25	Texas Electronics	Total precipitación caída en mm
Barómetro	CS106	Vaisala	Presión atmosférica en milibar
Sensor Altura de Nieve	SR50A-L34	Campbell Scientific	Altura (m), Altura compensada por temperatura (m), Altura programada menos altura compensada
Sensor Superficial Temp. Roca (2)	105E-L34	Campbell Scientific	Promedio de temperatura superficie glaciar en dos profundidades

Tabla 3.2. Otros componentes instalados en AWS de zona de ablación del glaciar Universidad.

Componente y/o accesorio	Código	Marca	Función
Adaptador que derrite nieve	CS705	Texas Electronics	Derrite precipitación nival para ser medida por pluviómetro
Datalogger	CR3000	Campbell Scientific	Almacenamiento de datos
Batería Recargable	-RC	Campbell Scientific	Provee de energía a estación meteorológica (por cada registro se obtiene voltaje en volts)
Panel Solar 10W	SX310M	BP Solar	Carga de batería
Caja Protectora	ENCN14/16-SC-MM	Campbell Scientific	Protección para datalogger y batería

Tabla 3.3. Sensores instalados en AWS de zona de acumulación del glaciar Universidad.

Sensor	Código	Marca	Datos obtenidos (intervalos de 15 minutos)
Anemómetro RM	05103	Young	Velocidad promedio y velocidad máxima del viento en km/h
Temperatura y Humedad	HMP45C-L11	Vaisala	Temperatura del aire (°C) y Presión atmosférica (mbar)
Radiómetro neto	CNR1	Kipp and Zonen	Radiación neta onda corta y larga (W/m^2), Radiación neta corregida por temperatura (W/m^2), Albedo (W/m^2).
Pluviómetro	TE525MM-L25	Texas Electronics	Total precipitación caída en mm
Barómetro	CS106	Vaisala	Presión atmosférica en milibar
Sensor Altura de Nieve	SR50A-L34	Campbell Scientific	Altura (m), Altura compensada por temperatura (m), Altura programada menos altura compensada

Tabla 3.4. Componentes instalados en AWS de zona de acumulación del glaciar Universidad.

Componente y/o accesorio	Código	Marca	Función
Adaptador que derrite nieve	CS705	Texas Electronics	Derrite precipitación nival para ser medida por pluviómetro
Datalogger	CR3000	Campbell Scientific	Almacenamiento de datos
Batería Recargable	-RC	Campbell Scientific	Provee de energía a estación meteorológica (por cada registro se obtiene voltaje en volts)
Panel Solar 10W	SX310M	BP Solar	Carga de batería
Caja Protectora	ENCN14/16-SC-MM	Campbell Scientific	Protección para datalogger y batería

Tabla 3.5. Sensores y Componentes Estación Fluviométrica usados e instalados en río San Andrés.

Sensor	Código	Marca	Datos obtenidos
Transductor de presión	SDI12 Serie 500	Gurley Precision Instruments	Altura de agua, rango 0 a 5 m
Molinete	622dg2n	Gurley Precision Instruments	Caudal (m ³ /s)
Regla Limnimétrica			Medición nivel de agua
Componente y/o accesorio			Función
Datalogger	AXSIS MPU	Stevens Water Monitoring Systems INC	Almacenamiento de datos
Baterías	PS-12260 NB	Power Sonic	Provee de energía a estación fluviométrica
Panel Solar	KS10T	Solartec	Carga de batería

3.3.2. Glaciar Mocho

Desde el inicio de este programa de monitoreo, se han realizado campañas de terreno bimensuales tanto para el mantenimiento de las balizas, la extracción de datos de la estación meteorológica y la excavación de pozos estratigráficos. A modo de ejemplo, durante una de las últimas campañas se recopilaban datos de la estación meteorológica y también se realizó una capacitación para guías de la fundación Huilo Huilo.

En lo que concierne el futuro seguimiento hidrológico en el glaciar Mocho, se instaló una estación fluviométrica de iguales características a la instalada en el frente del glaciar Universidad (Tabla 3.5).

3.4. INFORMES DE ACTIVIDADES EN TERRENO EN GLACIAR UNIVERSIDAD

3.4.1. Terreno 1: Octubre 2008

3.4.1.1. Introducción

Durante el día 22 de Octubre de 2008, personal del CECS, junto al inspector fiscal del proyecto, realizaron un vuelo de reconocimiento a los glaciares ubicados en las cabeceras de dos importantes cuencas de la VI región para la selección definitiva de un área piloto en esta zona del país. Estos son el Glaciar Cipreses (34°33'S/70°22'W), en las nacientes del Río homónimo, afluente del río Cachapoal; y el Glaciar Universidad (34°42'S/70°20'W), en las nacientes del río San Andrés, cuenca del río Tinguiririca. El vuelo contempló la exploración de los glaciares y alrededores, incluyendo las zonas de acumulación, la lengua terminal y el área periglacial, aterrizando en algunos puntos de interés para la futura instalación del instrumental.

Personal del CECS también visitó el glaciar ubicado sobre el Volcán Mocho-Choshuenco, donde actualmente se realizan actividades de investigación, determinándose *in situ* los reforzamientos de instrumentales postulados en la propuesta aprobada.

3.4.1.2. Objetivo general

El objetivo general fue realizar un vuelo de reconocimiento para determinar el glaciar piloto a monitorear en el contexto del desarrollo de una estrategia nacional de glaciares.

3.4.1.3. Objetivos Científicos

- Determinar condiciones de acceso de los glaciares visitados
- Determinar condiciones propias de la superficie glaciar en el contexto de desarrollar el monitoreo con seguridad
- Definir el glaciar piloto

3.4.1.4. Participantes en esta campaña de terreno

MSc. Francisca Bown (CECS), Logístico Marco Rodríguez (CECS), Fernando Escobar Cáceres (DGA, Inspector Fiscal del proyecto).

3.4.1.5. Duración

El reconocimiento tuvo una duración de 1 día (22 de Octubre de 2008).

3.4.1.6. Materiales utilizados

- Cámaras fotográficas
- Equipo de montaña de emergencia

3.4.1.7. Logística

El vuelo se realizó a bordo de un helicóptero Ecuriel Modelo AS-350 B3I de la empresa “Helicopters” de Rancagua, que demoró aproximadamente 5 horas en realizar este vuelo (Figura 3.4).

3.4.1.8. Resultados de las actividades realizadas

Se confirmó y definió al glaciar Universidad, en la cuenca del río Tinguiririca, Región de O'Higgins como el glaciar piloto a monitorear

Existen óptimas condiciones de accesibilidad debido a la existencia de un camino aproximadamente 10 km aguas abajo del frente del glaciar, de propiedad del proyecto hidroeléctrico San Andrés, y una topografía suave que permitiría cruzar el glaciar en toda su extensión en forma terrestre (Figura 3.5). En la zona existen servicios provistos por arrieros locales para el transporte de personal e instrumentos hasta el sitio. Los correspondientes permisos para acceder a los terrenos del predio “Las Cordilleras de El Perejil”, de propiedad de la Sociedad Agrícola Los Maitenes, deberán ser oportunamente gestionados por la DGA, con el fin de materializar las construcciones necesarias para la implementación de este monitoreo.

La Figura 3.6 indica la ubicación del glaciar Universidad, posible localización de la estación meteorológica de la zona de acumulación y la estación fluviométrica y un posible campamento base durante las visitas de mantención. Notar ubicación de laguna San José, donde se realizarán algunas mediciones puntuales de caudal.

3.4.1.9. Dificultades técnicas

No existieron dificultades técnicas en el desarrollo de esta actividad.



Figura 3.4. Helicóptero posado en cercanías del frente del glaciar Universidad.

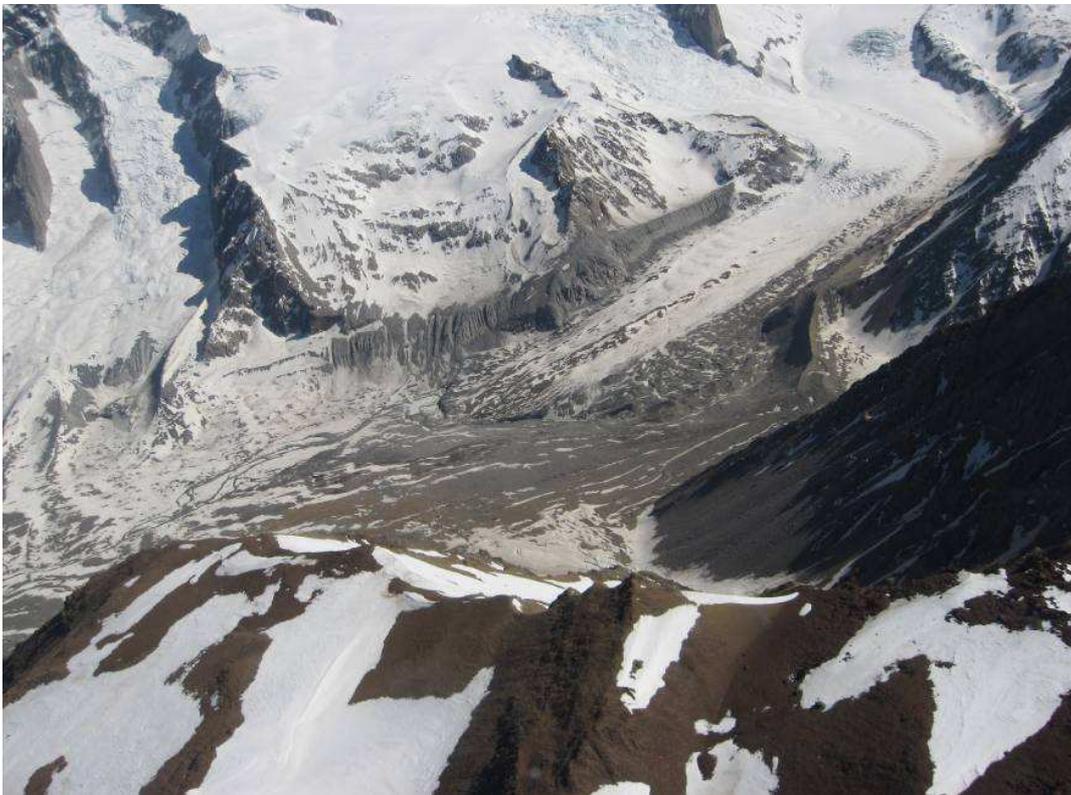


Figura 3.5. Frente del glaciar Universidad.

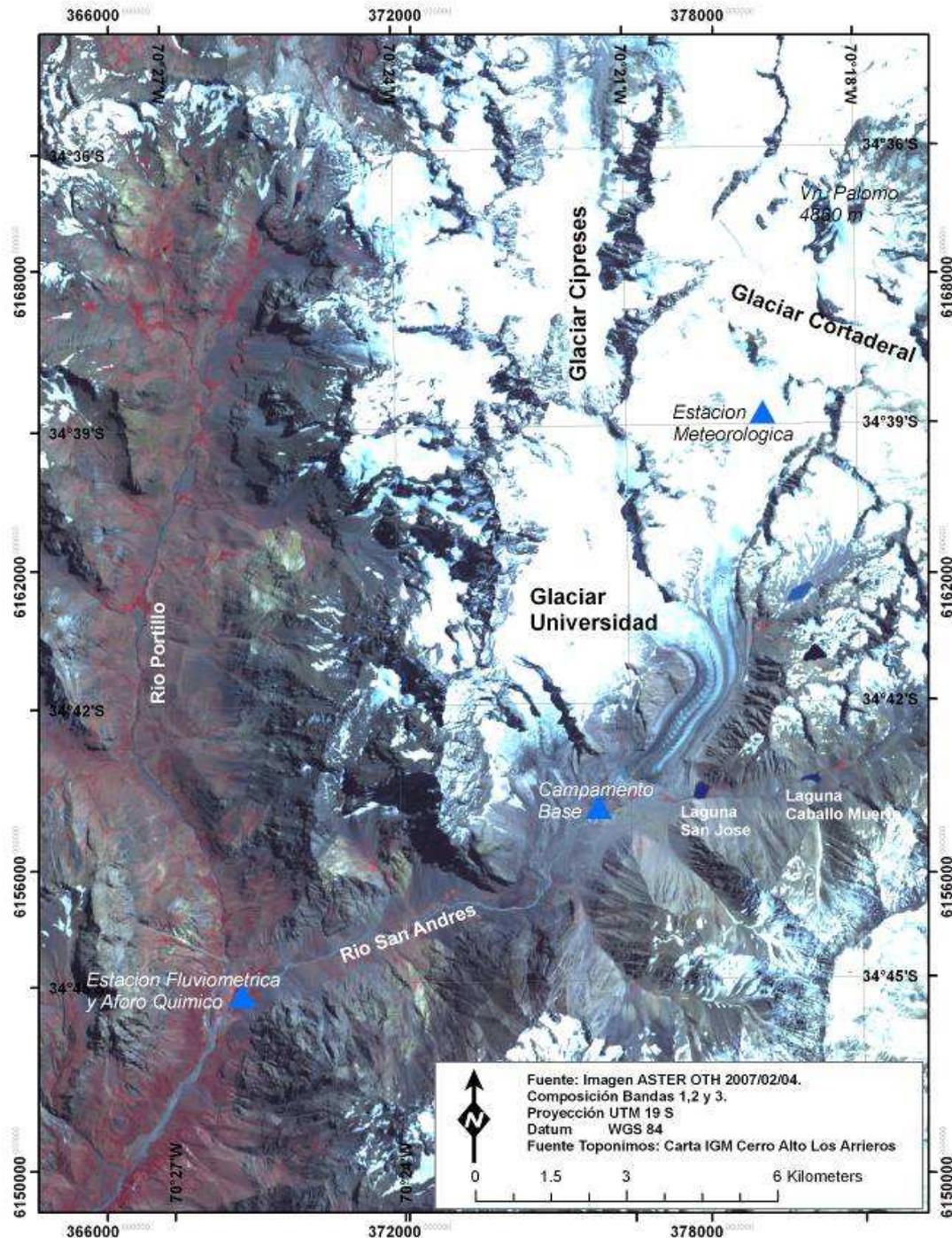


Figura 3.6. Posibles sitios de medición en glaciar universidad

3.4.1.10. Conclusiones

El glaciar Universidad presenta optimas condiciones para el monitoreo planificado durante el presente proyecto. Se espera que la realización de sucesivos terrenos permita la instalación de las estaciones y la realización de las mediciones dentro de un marco de seguridad de los operadores.

3.4.2. Terreno 2: Enero 2009

3.4.2.1. Introducción

Durante el mes de Enero del año 2009 se realizó una campaña de terreno al glaciar Universidad conducida por el Centro de Estudios Científicos en el marco del proyecto Desarrollo de una Estrategia Nacional de Glaciares encargado por la Dirección General de Aguas. El glaciar Universidad se encuentra ubicado en la cordillera de Los Andes de la zona central a una elevación de aproximadamente 2.440 m s.n.m. Se accedió al área de estudio internándose en camioneta hacia el interior de la ciudad de San Fernando por el valle del río San Andrés (Figura 3.7).

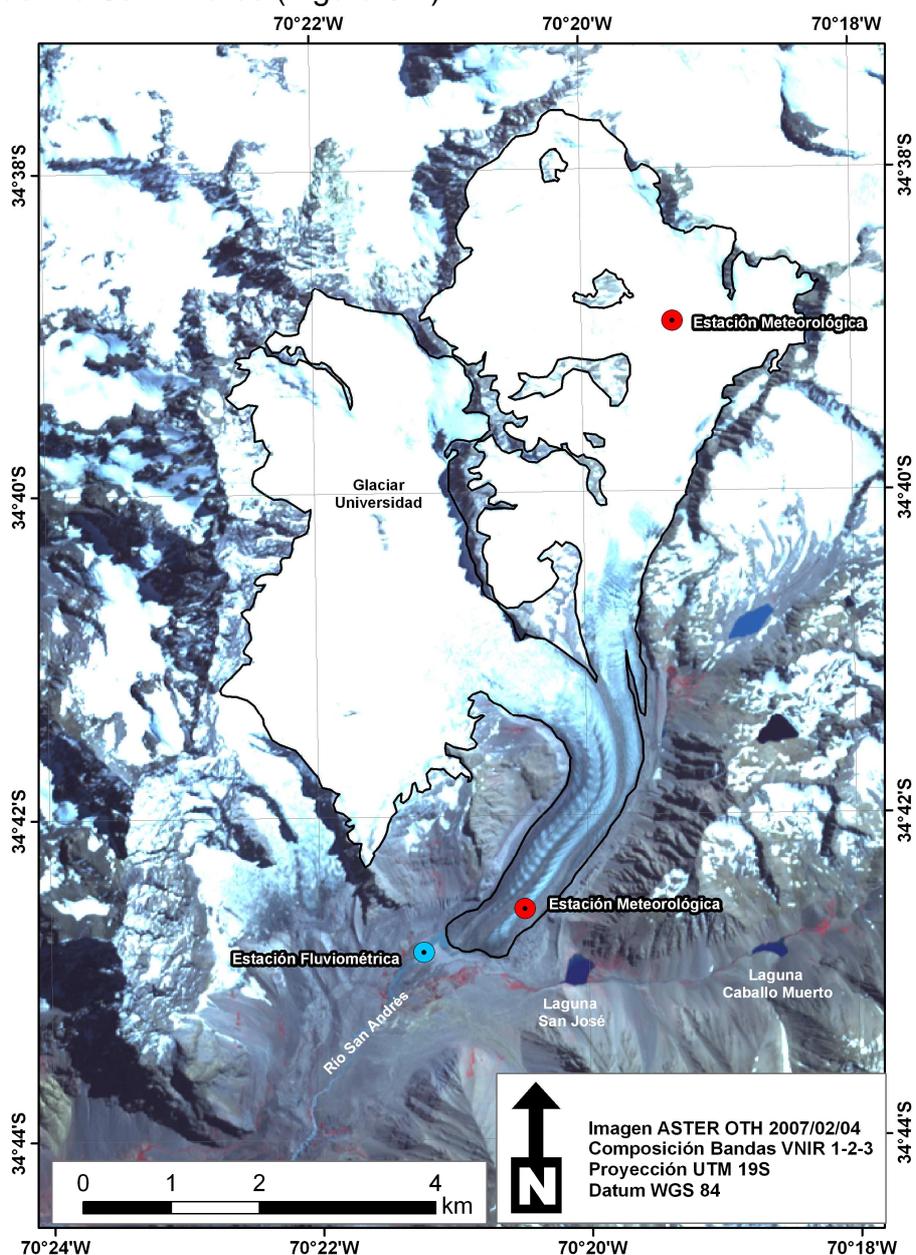


Figura 3.7. Imagen satelital ASTER mostrando el acceso y la ubicación glaciar Universidad. Los puntos indican los lugares tentativos para las instalaciones de la estación fluviométrica y aforo químico, y de las estaciones meteorológicas.

3.4.2.2. Objetivo general

El objetivo del terreno consistió en reconocer el acceso por tierra hasta la base del glaciar Universidad para dar inicio a las actividades de monitoreo glaciológico e hidrológico, consistentes en la instalación de una red de balizas para mediciones de balance de masa glaciar, de dos perfiles metálicos como soporte de instrumentos de estaciones meteorológicas y para la prospección de sitios favorables para la instalación de una estación fluviométrica y de aforo químico.

3.4.2.3. Objetivos científicos

- Instalación de balizas para mediciones de balance de masa
- Monumentación de un punto GPS base y mediciones con GPS diferencial
- Instalación de perfiles metálicos para soporte de las Estaciones Meteorológicas
- Mediciones de densidad de nieve con taladro Monte Rose.

3.4.2.4. Integrantes CECS participantes en la campaña a terreno

Claudio Bravo, Marcos Rodríguez y Pablo Zenteno.

3.4.2.5. Duración

Los trabajos tuvieron una duración de 7 días partiendo desde la ciudad de Valdivia el día 17/01/2009 y regresando el día 23/01/2009.

3.4.2.6. Materiales utilizados

A continuación se enumeran los materiales utilizados durante la campaña de terreno, los que se distribuyeron en un total de 16 cajas y sumando en total 211,15 kg.

- 6 Balizas de PVC de 3 m
- 2 Perfiles de aluminio de 3 m
- 2 Receptores GPS geodésicos. Base (32 MB – 1Hz) + móvil con jalón
- 2 Baterías 12 V / 18Ah
- 1 Taladro a vapor Heucke
- 1 Taladro Monte Rose

- 1 Generador
- Materiales para Monumentación
- Equipo de alta montaña

3.4.2.7. Logística

Se accedió al área de estudio en camioneta 4x4 hasta el sector de faenas de la empresa hidroeléctrica La Higuera. Posteriormente se coordinó para la mañana siguiente el arriendo de 5 mulas y dos caballos con 2 arrieros para ayudar a portear los equipos una distancia aproximada de 10 km, teniendo que vadear el río San Andrés para hasta llegar a la lengua terminal del glaciar dónde se instaló el campamento base. La planificación de las tareas se realizó previamente localizando las balizas sobre una imagen satelital ASTER (Figura 3.8).

3.4.2.8. Resultados de las actividades realizadas

Se logró instalar exitosamente una red de 6 balizas en la zona de ablación del glaciar para medición del balance de masa utilizando para las perforaciones el taladro a vapor Heucke (Figura 3.9 y Tabla 3.6). También se instaló en la zona de ablación del glaciar el perfil metálico para soporte de las estaciones meteorológicas (EM) a 1,55 m de profundidad, quedando una altura de 1,45 m sobre la superficie del hielo. El segundo perfil se instaló a mayor elevación cerca de la zona de acumulación del glaciar (Tabla 3.7). En forma simultánea a estos trabajos se efectuaron durante todos los días de trabajo, mediciones sobre la superficie del glaciar con un sistema GPS JAVAD en modo cinemático para localización de perfiles de las EM.

Tabla 3.6. Alturas medidas en las balizas instaladas en glaciar Universidad.

Baliza Nº	Largo balizas (m)	Altura sobre superficie de hielo (m)	Fecha de instalación
1	3,07	0,47	20/01/2009
2	3,00	0,45	20/01/2009
3	3,10	0,36	20/01/2009
4	3,06	0,43	20/01/2009
6	3,04	0,38	20/01/2009
8	3,16	0,38	20/01/2009

Tabla 3.7. Puntos GPS medidos en terreno con navegador Garmin etrex Vista HCx para ubicación de las balizas. Coordenadas en proyección UTM en metros, zona 19 S, datum WGS84.

Nombre	Elevación (m s.n.m)	UTM E (m)	UTM N (m)
Campo Base	3277,47	375123,80	6156621,70
Monumentación GPS	2404,36	375177,81	6156664,25
Perfil EM-01	2407,24	377174,20	6158347,04
Baliza-01	2425,75	377173,48	6158339,05
Baliza-02	2605,03	377421,97	6158726,25
Baliza-03	2718,71	377789,74	6159265,67
Baliza-04	2719,67	378222,79	6160130,70
Baliza-06	2873,48	378083,65	6161001,81
Baliza-07	2900,40	378029,33	6161395,52
Perfil EM-02	3300,54	378835,61	6163038,12

3.4.2.9. Dificultades técnicas

Diversas dificultades tuvieron lugar durante la campaña a terreno. Una de ellas es que no fue posible realizar mediciones de densidad con el sistema Monte Rose debido a la presencia de superficie de hielo y ausencia de nieve. Otra dificultad para la consecución de los objetivos científicos se debe a que después del medio día se producen tormentas eléctricas que podrían poner en riesgo la integridad física del personal. En algunas zonas de acarreo al montarse a la parte alta del glaciar se presentan zonas con derrumbes que implicarían la necesidad de contar con cascos de seguridad para futuras campañas de terreno.

3.4.2.10. Conclusiones

El acceso al glaciar Universidad por tierra en camioneta no presenta mayores dificultades hasta el sector de las faenas de la empresa hidroeléctrica. Luego, la aproximación al glaciar es relativamente larga (8 hrs.), no obstante el apoyo de las mulas permite hacer el viaje sin carga hasta el campamento base, logrando un desgaste físico mínimo para la consecución del resto de los objetivos científicos. Finalmente, fue posible cumplir en gran medida los objetivos científicos planteados, sin embargo en próximas campañas por tierra debe ser necesario contar con al menos una persona más de apoyo para establecer un campamento de avanzada y realizar con más tiempo los trabajos en la zona de acumulación del glaciar.

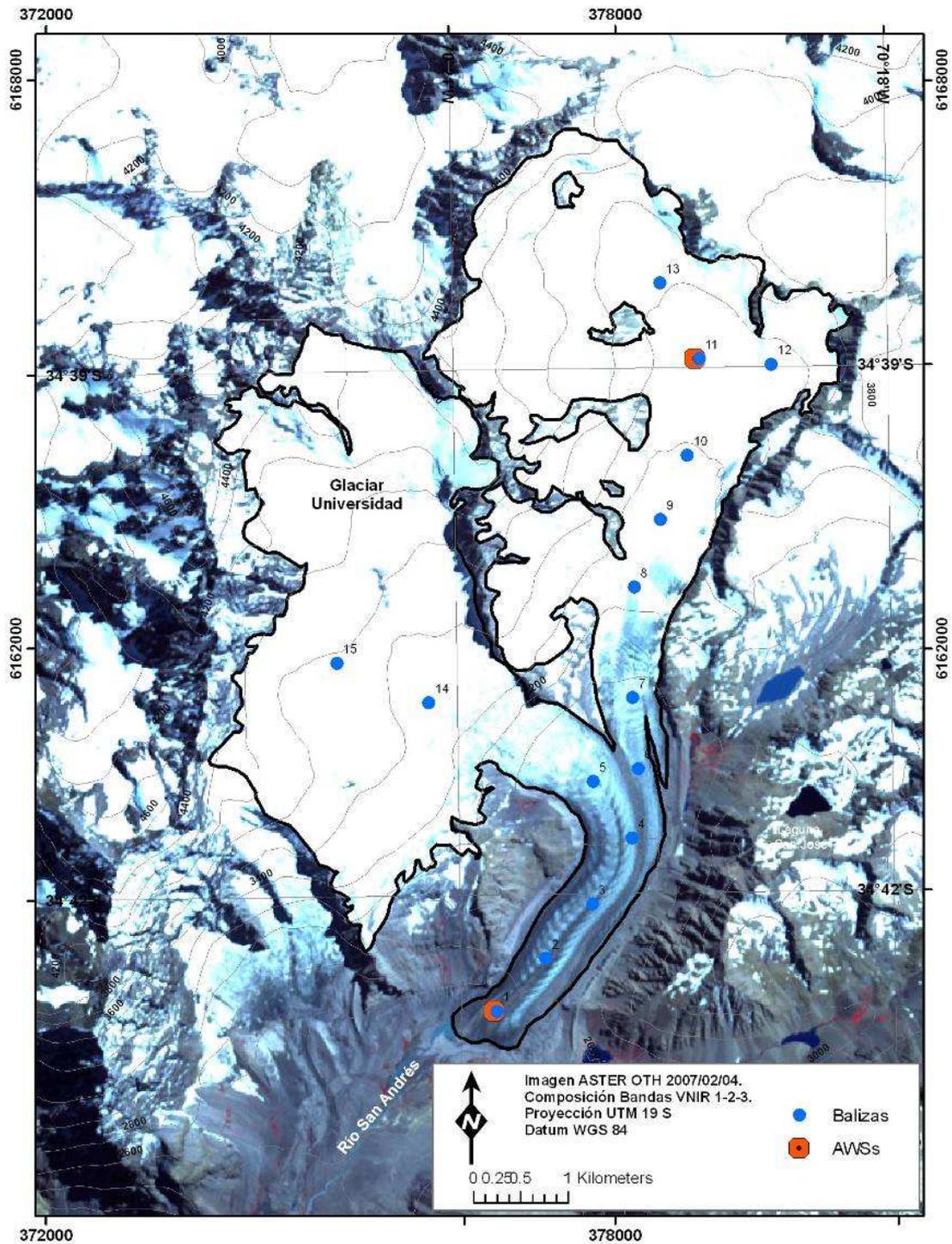


Figura 3.8. Imagen satelital ASTER mostrando el glaciar Universidad. Los puntos azules indican los lugares tentativos para las instalaciones de las balizas y los anaranjados de las estaciones meteorológicas.

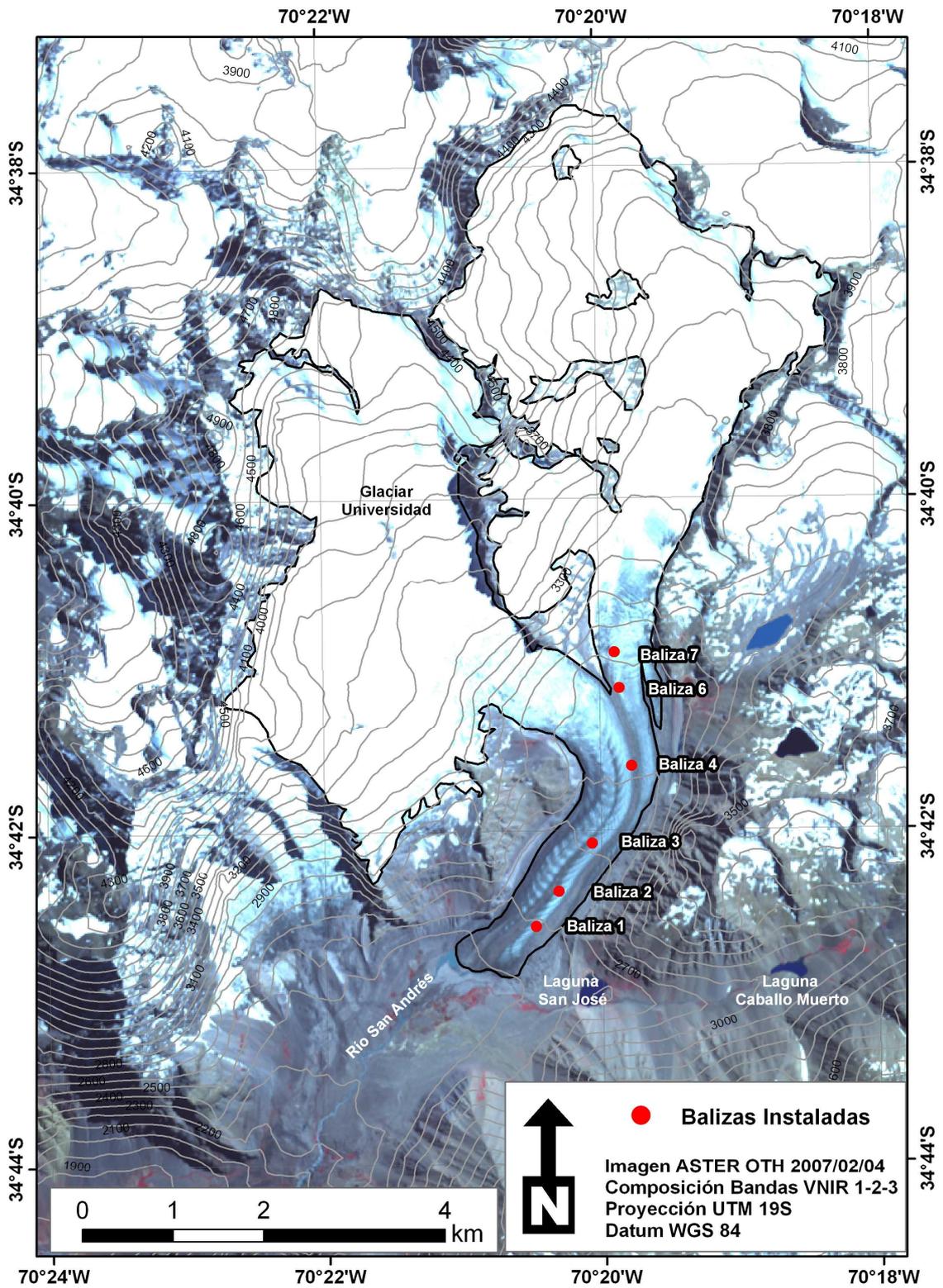


Figura 3.9. Imagen satelital ASTER mostrando el glaciar Universidad. Los puntos rojos indican la ubicación final de las balizas instaladas para medición de balance de masa.

3.4.2.11. Descripción de actividades por día

3.4.2.11.1. 1^{er} día: 17/01/2009

Traslado desde Valdivia hasta el sector de las faenas de la central hidroeléctrica. Se coordina el arriendo de los mulares y asistencia de arrieros. Por la tarde se terminan de preparar las balizas y de construir los perfiles para las EM (Figura 3.10).



Figura 3.10. Claudio Bravo y Marcos Rodríguez en la preparación de perfiles de aluminio para EM en sector de faenas de la hidroeléctrica.

3.4.2.11.2. 2^{do} día: 18/01/2009

Preparación de la carga para los mulares y se inicia la aproximación al glaciar Universidad desde el sector de faenas de la central. La aproximación toma alrededor de 8 horas para una distancia en línea recta de ~ 10 km y con un desnivel de ~ 850 m. A los 3,5 km es necesario realizar el cruce del río San Andrés el cual es bastante torrencioso y no deja de ser un riesgo para la carga que se transporta (Figura 3.11).



Figura 3.11. Los arrieros y sus mulares vadeando el río San Andrés. Foto: M. Rodríguez.

Los arrieros dejan los equipos y carga en un lugar no acordado y sin dar aviso a una distancia de 1,6 km de la laguna glacial. Vadeamos el río cerca de la desembocadura de la laguna y al montarnos en una morrena divisamos la carga sin los arrieros. Bajamos al lugar de los equipos para montar el campamento planificar los trabajos del siguiente día. Por las noches se escuchan avalanchas de rocas con duraciones de más de 4 minutos.

3.4.2.11.3. 3^{er} día: 19/01/2009

Monumentación para la instalación del equipo GPS JAVAD base. Instalación de balizas de 6 m de largo mas el perfil de aluminio de 3 m para EM, todas en superficie de hielo (Figura 3.12)

3.4.2.11.4. 4^{to} día: 20/01/2009

Ascendemos hasta la localización de la baliza N° 6 con perfiles metálicos, GPS, taladros Heucke y Monte Rose. Realizamos un campamento de avanzada en vivac para el día siguiente atravesar la cascada de hielo y montarse sobre la zona de acumulación del glaciar. Al atardecer comienza tormenta eléctrica con lluvias débiles.

3.4.2.11.5. 5^{to} día: 21/01/2009

Aproximación y ascenso hacia la cascada de hielo, llegamos a sectores con grietas de hasta 30 m de profundidad (Figura 3.13). Debido a las condiciones atmosféricas con presencia de rayos se decide dejar instalado el perfil y dejar también el jalón del GPS para retornar hacia el campamento vivac.

3.4.2.11.6. 6^{to} día: 22/01/2009

Regreso con los mulares hasta el sector de faenas de la central hidroeléctrica, hacia el interior del valle se observan condiciones atmosféricas con tormenta eléctrica. Llegada a Valdivia el 23/01/2009 aproximadamente a las 2:00 am.

3.4.3. Terreno 3: Marzo 2009

3.4.3.1. Introducción

Durante el mes de Marzo del año 2009 se realizó una tercera campaña de terreno al glaciar Universidad conducida por el Centro de Estudios Científicos en el marco del proyecto Desarrollo de una Estrategia Nacional de Glaciares

encargado por la Dirección General de Aguas. El glaciar Universidad se encuentra ubicado en la cordillera de Los Andes de la zona central a una elevación de aproximadamente 2.440 m s.n.m. Se accedió al área de estudio internándose en camioneta hacia el interior de la ciudad de San Fernando por el valle del río San Andrés (Figura 3.14).



Figura 3.12. Izquierda: Monumentación para GPS base. Derecha: Perfil de aluminio para estación meteorológica montada sobre la zona de ablación del glaciar Universidad. Fotos: M. Rodríguez.



Figura 3.13. Izquierda: Progresando por las zonas de grietas. Derecha: Instalación de segundo perfil metálico para estación meteorológica a 3.300 m s.n.m. Foto: M. Rodríguez. Fotos: P. Zenteno y M. Rodríguez.

3.4.3.2. Objetivo general

El objetivo del terreno consistió en la instalación de una estación meteorológica (AWS) y un pluviómetro. Además se realizó la medición de la red de balizas para mediciones de balance de masa glaciaria instaladas durante la segunda campaña de terreno y finalmente la prospección de sitios favorables para la instalación de una cámara fotográfica. Durante toda la campaña de terreno se realizaron mediciones con sistema GPS diferencial.

3.4.3.3. Objetivos científicos

- Instalación de Estación Meteorológica (AWS) y pluviómetro
- Medición de balizas para balance de masa
- Prospección de sitio para instalación de cámara fotográfica
- Mediciones con GPS diferencial

3.4.3.4. Integrantes CECS participantes en la campaña a terreno

Claudio Bravo, Camilo Rada y Pablo Zenteno.

3.4.3.5. Duración

Los trabajos tuvieron una duración de 7 días partiendo desde la ciudad de Valdivia el día 23/03/2009 y regresando el día 30/03/2009.

3.4.3.6. Materiales utilizados

A continuación se enumeran los materiales utilizados durante la campaña de terreno, los que se distribuyeron en un total de 16 cajas y sumando en total 211,15 kg.

- 6 Balizas de PVC de 4 m
- 2 Perfiles de aluminio de 4 y 3 m respectivamente
- 2 Receptores GPS. Base (32 MB – 1Hz) + móvil con jalón
- 2 Baterías 12 V / 18Ah y 8 baterías de 2000 mAh
- 1 Taladro a vapor Heucke
- 1 Generador
- Materiales para instalación de estación meteorológica y pluviómetro
- Un computador portátil para descarga de datos
- Equipo de alta montaña

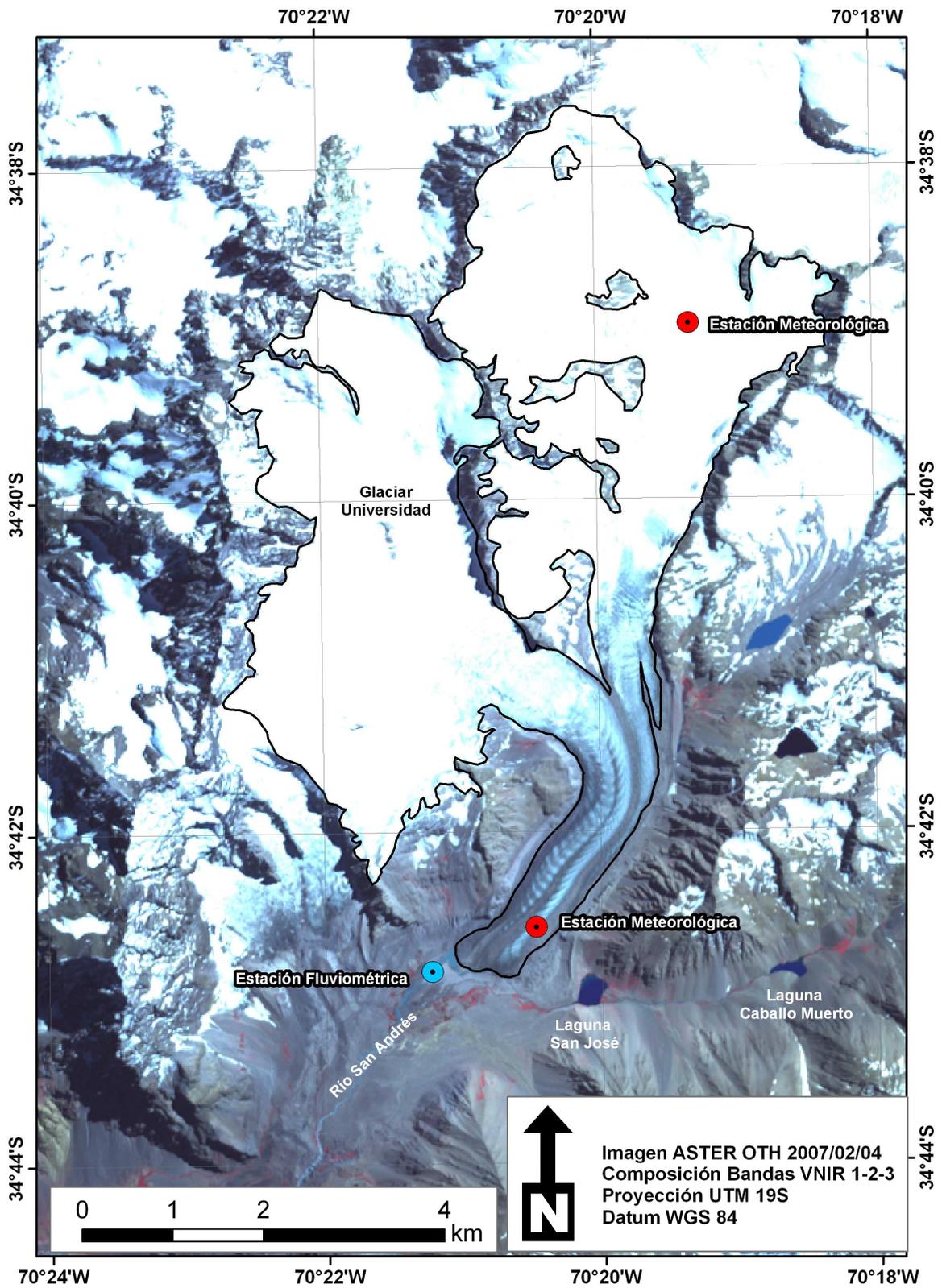


Figura 3.14. Imagen satelital ASTER mostrando el acceso y la ubicación glaciar Universidad. Los puntos indican los lugares tentativos para las instalaciones de la estación fluviométrica y de las estaciones meteorológicas.

3.4.3.7. Logística

Se accedió al área de estudio en camioneta 4x4 hasta el sector de faenas de la empresa hidroeléctrica La Higuera. Posteriormente se coordinó para la mañana siguiente el arriendo de 6 mulas y dos caballos con 2 arrieros para ayudar a portear los equipos una distancia aproximada de 5 km, teniendo que vadear el río San Andrés hasta llegar a la lengua terminal del glaciar donde se instala el campamento base. Esta vez el encuentro con los arrieros se coordinó en un lugar más cercano a la morrena, ya que el camino se ha habilitado en una mayor extensión por lo que el campamento base se instala a 300 metros del frente del glaciar.

3.4.3.8. Resultados de las actividades realizadas

Se encontraron las 6 balizas instaladas durante la campaña anterior (Figura 3.15 de Marzo del 2009) completamente expuestas sobre el hielo, por lo tanto se asume que la ablación ocurrida durante los meses de Enero hasta Marzo fue de un mínimo de 3,16 m tomando en cuenta la baliza más larga instalada (Nº7). En consecuencia todas las balizas fueron reinstaladas y además de una baliza adicional (Nº 5) en la zona de ablación del glaciar (Tabla 3.8). También se instaló en la zona de ablación del glaciar el perfil metálico de 4 m para soporte de las estaciones meteorológicas (EM) a 2,55 m de profundidad, quedando una altura de 1,45 m sobre la superficie del hielo. Los perfiles de la EM y del pluviómetro se instalaron próximos a la baliza Nº 2 (Tabla 3.9). En forma simultánea a estos trabajos se efectuaron durante todos los días de trabajo, mediciones sobre la superficie del glaciar con un sistema GPS JAVAD de base y cinemático Trimble en modo cinemático para localización de perfiles de las EM.

Tabla 3.8. Alturas medidas en las balizas instaladas en glaciar Universidad.

Baliza Nº	Largo balizas (m)	Altura sobre superficie de hielo (m)	Fecha de instalación
1	5	0,27	27/03/2009
2	4	0,20	28/03/2009
3	4	0,23	28/03/2009
4	4	0,29	28/03/2009
5	3,97	0,22	28/03/2009
6	4	0,20	28/03/2009
7	5	0,20	28/03/2009

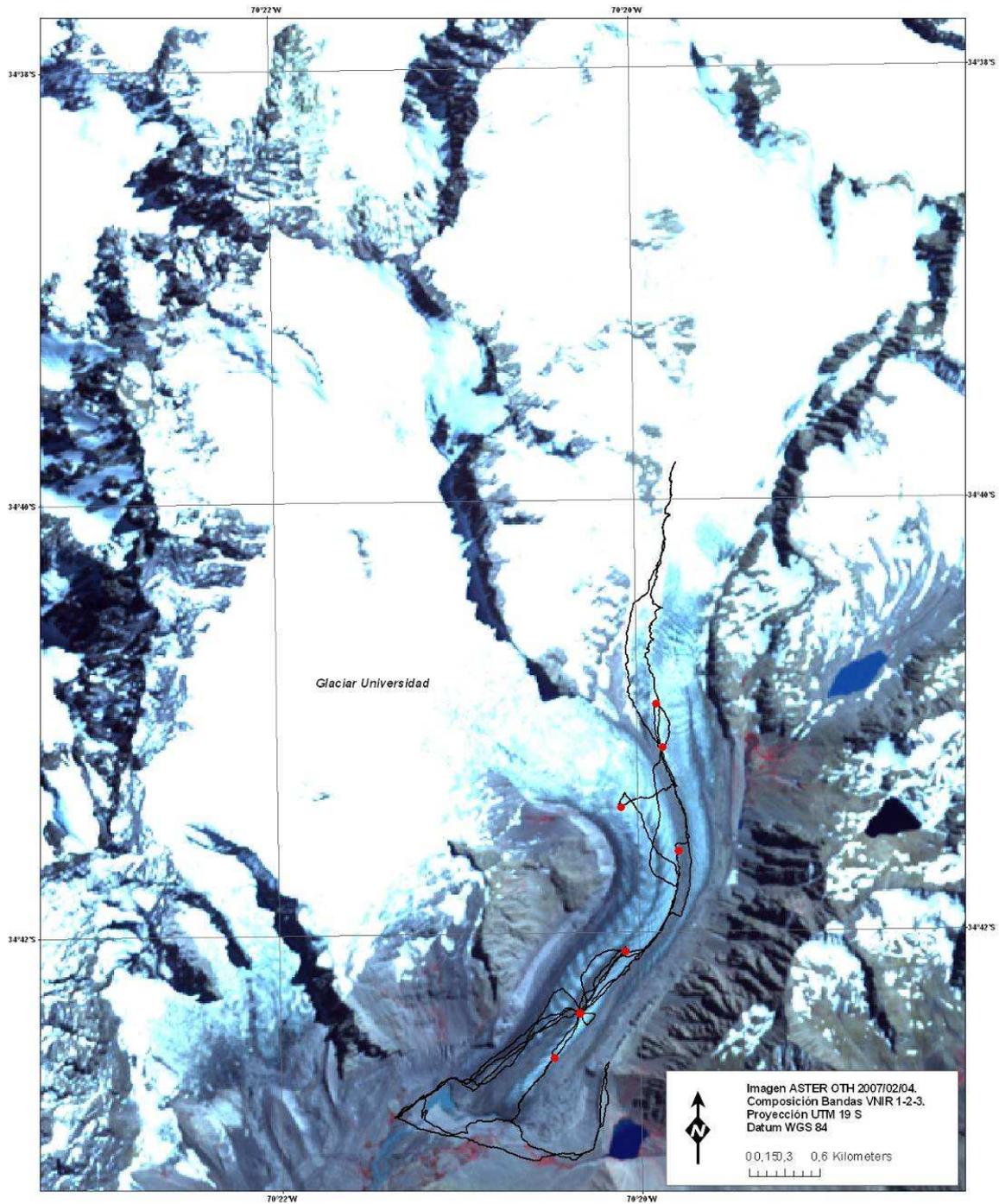


Figura 3.15. Imagen satelital ASTER mostrando el glaciar Universidad. Los puntos rojos indican la ubicación de la red de balizas para medición de balance de masa. La línea en negro muestra los recorridos realizados sobre el glaciar con el receptor GPS JAVAD.

Tabla 3. 9. Puntos GPS medidos en terreno con navegador Trimble 5700 , antena Zephyr para ubicación de las balizas. Coordenadas en proyección UTM en metros, zona 19 S, datum WGS84.

Nombre	Elevación (m s.n.m)	UTM E (m)	UTM N (m)
Campo Base	2435	376206,270	6157452,499
EM - PLV	2650	377388,565	6158712,702
Baliza-01	2598	377172,566	6158336,256
Baliza-02	2646	377389,589	6158719,945
Baliza-03	2733	377773,591	6159245,954
Baliza-04	2828	378221,284	6160103,146
Baliza-05	2872	377733,420	6160476,596
Baliza-06	2868	378084,460	6160987,830
Baliza-07	2939	378030,225	6161362,547

3.4.3.9. Dificultades técnicas

Problemas técnicos del taladro Heucke debido al mal funcionamiento de la válvula posterior a la cual se conecta el estanque de gas. El problema fue solucionado temporalmente con enganches de goma y tornillos para ejercer presión sobre la válvula evitando escape de gas.

3.4.3.10. Conclusiones

Se cumplieron todos los objetivos científicos planteados. La estación meteorológica y el pluviómetro quedaron operativos. Se logró completar la reinstalación de la red de balizas. Además se logró realizar un intenso mapeo de la superficie del glaciar con el receptor GPS diferencial.

3.4.3.11. Descripción de actividades por día

3.4.3.11.1. 1^{er} día: 24/03/2009

Traslado desde Valdivia hasta el sector de las faenas de la central hidroeléctrica. Se coordina el arriendo de los mulares y la asistencia de arrieros con el Sr. R. Salazar.

3.4.3.11.2. 2^{do} día: 25/03/2009

Preparación de la carga para los mulares y se inicia la aproximación al glaciar Universidad desde el sector de faenas de la central. La aproximación toma alrededor de 3 horas debido a la extensión del camino de penetración por parte de la faena. Los arrieros dejan los equipos y carga en un a una distancia de 500 m del frente del glaciar (Figura 3.16), donde se instala el campamento base (Figura 3.17).



Figura 3.16. Camilo Rada portando el perfil para la estación meteorológica y los mulares transportando la carga.

3.4.3.11.3. 3^{er} día: 26/03/2009

Se realiza el porteo del instrumental científico y de los perfiles de soporte para la estación meteorológica. Instalación del soporte con taladro a vapor Heucke. Medición de baliza N° 1 y se retira el perfil de aluminio instalado en la segunda campaña (Figura 3.18 y 3.19).

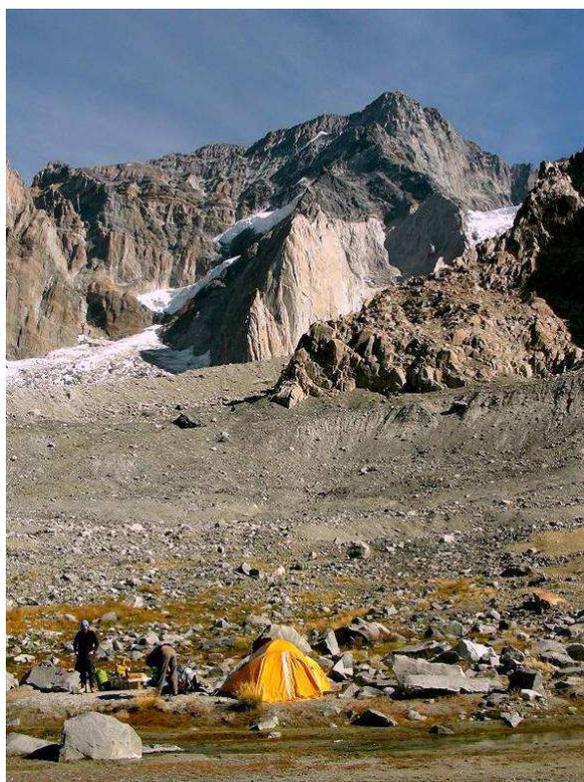


Figura 3.17. Instalación de campamento base. Fotos: C. Bravo y C. Rada.



Figura 3.18. Pablo Zenteno portando instrumental para la estación meteorológica en el lugar de la baliza N° 1. Foto C. Bravo.

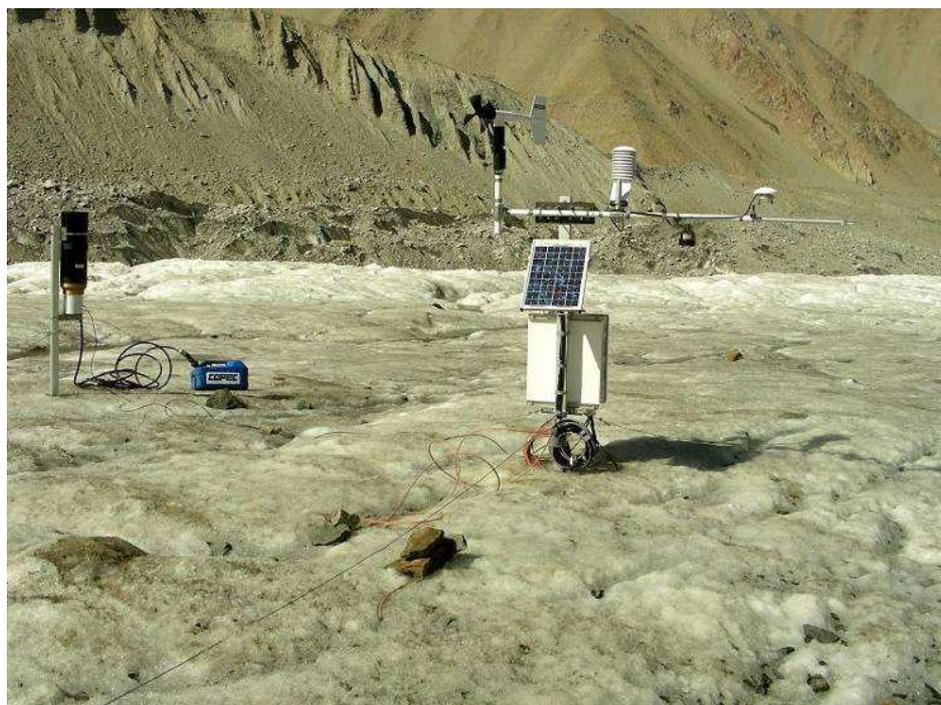


Figura 3.19. Instalación de estación meteorológica en el lugar de la baliza N° 2. Foto: C. Bravo.

3.4.3.11.4. 4^{to} día: 27/03/2009

Medición y reinstalación de balizas con GPS N° 2, 3, 4, 6 y 7. Instalación de balizas (Figura 3.20).



Figura 3.20. Camilo Rada reinstalando la baliza N° 4 y efectuando mediciones con GPS.

3.4.3.11.5. 5^{to} día: 28/03/2009

Se realizan mediciones con GPS intentando acceder a la zona de acumulación del glaciar por el margen NE (Figura 3.21).



Figura 3.21. Accediendo a la zona de acumulación del glaciar por zonas de grietas. Foto: C. Rada.

3.4.3.11.6. 6^{to} día: 29/03/2009

Regreso con los mulares hasta el sector de faenas de la central hidroeléctrica. Llegada a Valdivia el 30/03/2009 aproximadamente a las 2:30 am.

3.4.4. Terreno 4: Mayo 2009

3.4.4.1. Introducción

Durante el mes de Mayo del año 2009 se realizó una cuarta campaña de terreno al glaciar Universidad conducida por el Centro de Estudios Científicos en el marco del proyecto Desarrollo de una Estrategia Nacional de Glaciares encargado por la Dirección General de Aguas. El glaciar Universidad se encuentra ubicado en la cordillera de Los Andes de la zona central a una elevación de aproximadamente 2.440 m s.n.m. Se accedió al área de estudio internándose en camioneta hacia el interior de la ciudad de San Fernando por el valle del río San Andrés.

3.4.4.2. Objetivo general

El objetivo del terreno consistió en la toma de datos meteorológicos y reinstalación de la estación meteorológica a un soporte más estable y de la medición de la red de balizas para mediciones de balance de masa glaciar. También se realizó nuevamente una intensa toma de datos de la superficie del glaciar mediante GPS de precisión geodésico.

3.4.4.3. Objetivos científicos

- Toma de datos de la estación meteorológica
- Reinstalación de estación meteorológica a un trípode de fierro
- Medición y reinstalación de balizas para balance de masa
- Determinación de lugar para realización de aforos
- Mediciones con GPS diferencial

3.4.4.4. Integrantes participantes en la campaña a terreno

Claudio Bravo (CECS), Camilo Rada (CECS) y Pablo Zenteno (CECS). Cristián Gálvez (Consultor CECS) junto a un asistente de terreno.

3.4.4.5. Duración

Los trabajos tuvieron una duración de 4 días partiendo desde la ciudad de Valdivia el día 06/05/2009 y regresando el día 09/05/2009.

3.4.4.6. Materiales utilizados

A continuación se enumeran los materiales utilizados durante la campaña de terreno:

- 6 Balizas de PVC de 5 m
- 1 trípode de fierro
- 2 Receptores GPS. Base JAVAD (32 MB – 1Hz) + móvil Trimble 5700 con jalón.
- 2 Baterías 12 V / 18Ah
- 1 Taladro a vapor Heucke
- Un computador portátil para descarga de datos
- Materiales para instalación de Estación Meteorológica
- Equipo de alta montaña

3.4.4.7. Logística

Se accedió al área de estudio en camioneta 4x4 hasta el sector de faenas de la empresa hidroeléctrica La Higuera. Posteriormente se coordinó para la mañana siguiente el arriendo de 5 mulas y dos caballos con 2 arrieros para ayudar a portear los equipos una distancia aproximada de 4 km, teniendo que vadear el río San Andrés para hasta llegar a la lengua terminal del glaciar dónde se instala el campamento base. Esta vez el encuentro con los arrieros se coordinó en el mismo lugar de la tercera campaña de terreno. Se dividió en dos el equipo de trabajo, dónde los consultores externos accedieron hacia el frente del glaciar por el NE de la morrena, guiados por Camilo Rada (CECS). Los otros dos miembros CECS accedieron por la ruta normal junto a los mulares y arrieros. Se instaló el campamento base en la rivera opuesta del campamento anterior con el objeto de hacer más rápido el acceso al glaciar.

3.4.4.8. Resultados de las actividades realizadas

Se logró determinar un lugar para la instalación de la estación fluviométrica. También se realizó la medición y reinstalación de 4 balizas (ver sección de resultados). Luego se procedió a tomar los datos y a cambiar de soporte la estación meteorológica y a modificar el soporte del sensor de pluviometría. En forma simultánea a estos trabajos se efectuaron durante todos los días mediciones sobre la superficie del glaciar con un sistema GPS Trimble 5700 en

modo cinemático. Se recuperaron los datos de la estación Meteorológica (Figura 3.22)



Figura 3.22. Estado en que se encontró la estación meteorológica junto al pluviómetro.

Resultados preliminares de trabajos en terreno: Aforo del río San Andrés.

AFORO DE CAUDAL LIQUIDO

ESTACION : rio san andres glaciar universidad
 ALTITUD S.N.M. :
 COORDENADAS U.T.M. :

FECHA DE AFORO :07-05-2009

ALTURA LM MEDIA : M
 CAUDAL TOTAL :2.162 M3/S

CAUDAL :2.162 M3/S
 VELOCIDAD MEDIA :0.744 M/S
 PROFUNDIDAD MEDIA :0.323 M
 AREA SECCION :2.907 M2

PERIMETRO MOJADO :9.323 M
 RADIO HIDRAULICO :0.312 M
 FACTOR HIDRAULICO DE MANNING :1.618 Q/(AR**(2/3))
 FACTOR HIDRAULICO DE CHEZY :1.332 Q/(AR**(1/2))

ANGULO HOR.	ABSCISA M	TRAMO VERTICAL	DE LA VERTICAL	VELOC M/S	ANGULO VERT.	PROFUN. TOTAL M	C A U D A L M3/S VERT	% ACUM	% TOTAL
0.00	0.150			0.204		5	0.002	0.002	0.1
0.30	0.400			0.215		8	0.004	0.006	0.3
0.50	0.750			0.268		9	0.008	0.014	0.7
1.00	1.250			0.446		15	0.033	0.048	2.2
1.50	1.750			0.703		30	0.105	0.153	7.1
2.00	2.250			0.884		40	0.177	0.330	15.3
2.50	2.750			0.816		38	0.155	0.485	22.4
3.00	3.250			0.936		40	0.187	0.672	31.1
3.50	3.750			1.065		40	0.213	0.885	41.0
4.00	4.250			0.907		45	0.204	1.089	50.4
4.50	4.750			0.997		50	0.249	1.339	61.9
5.00	5.250			0.793		44	0.175	1.513	70.0
5.50	5.750			0.907		44	0.199	1.713	79.2
6.00	6.250			0.589		40	0.118	1.830	84.7
6.50	6.750			0.657		40	0.131	1.962	90.8
7.00	7.250			0.490		35	0.086	2.048	94.7
7.50	7.750			0.476		32	0.076	2.124	98.3
8.00	8.250			0.249		24	0.030	2.154	99.6
8.50	8.750			0.124		10	0.006	2.160	99.9
9.00	9.000			0.124		5	0.002	2.162	100.0

3.4.4.9. Dificultades técnicas

No se presentaron mayores dificultades técnicas en los trabajos de terreno.

3.4.4.10. Conclusiones

Fue posible cumplir en gran medida los objetivos científicos planteados. Se logró determinar un sitio apropiado para la instalación de la estación fluviométrica, realizándose las primeras mediciones de aforo del río San Andrés a corta distancia del frente del glaciar Universidad. Sin embargo debido a constricciones de tiempo solamente se realizó la medición y reinstalación de 4 balizas para medición de balance de masa.

3.4.4.11. Descripción de actividades por día

3.4.4.11.1. 1^{er} día: 06/05/2009

Traslado desde Valdivia hasta el sector de las faenas de la central hidroeléctrica. Se coordina el arriendo de los mulares y asistencia de arrieros.

3.4.4.11.2. 2^{do} día: 07/05/2009

Preparación de la carga para los mulares y se inicia la aproximación al glaciar Universidad desde el sector de faenas de la central. Se inicia la aproximación al frente del glaciar desde las dos riveras del río San Andrés, demorando alrededor de 3 horas debido a la extensión del camino de penetración por parte de la faena. Los arrieros dejan los equipos y carga a una distancia de 400 m del frente del glaciar. El equipo de consultores externos junto a Camilo Rada (CECS), realizan el aforo del río San Andrés a una distancia de 280 m desde el frente del glaciar para determinar el lugar de instalación de la futura estación fluviométrica.

3.4.4.11.3. 3^{er} día: 08/05/2009

Descarga de los datos y se procede a cambiar la estación meteorológica al trípode y a modificar el soporte del sensor de pluviometría. Mediciones sobre la superficie del glaciar con un sistema GPS Trimble 5700 en modo cinemático. Reinstalación y medición de balizas N° 1, 2, 3 y 4.

3.4.4.11.4. 4^{to} día: 09/05/2009

Regreso con los mulares hasta el sector de faenas de la central hidroeléctrica, hacia el interior del valle se observan condiciones atmosféricas con tormenta eléctrica. Llegada a Valdivia el 10/05/2009 aproximadamente a las 2:30 am.

3.4.5. Terreno 5: Octubre-Noviembre 2009

3.4.5.1. Introducción

Durante la primera semana de Octubre del año 2009 se realizó la 4^{ta} campaña de terreno al glaciar Universidad conducida por el Centro de Estudios Científicos en el marco del proyecto Desarrollo de una Estrategia Nacional de Glaciares encargado por la Dirección General de Aguas. El glaciar Universidad se encuentra ubicado en la cordillera de Los Andes de la zona central a una elevación de aproximadamente 2.440 m s.n.m. Al igual que en las campañas anteriores se accedió al área de estudio internándose en camioneta hacia el interior de la ciudad de San Fernando por el valle del río San Andrés hacia el sector de La Confluencia.

3.4.5.2. Objetivo general

El objetivo del terreno consistió en la mantención de los sensores de la estación meteorológica (AWS), la reinstalación de la red de balizas para mediciones de balance de masa glaciar, realización de mediciones de densidad y profundidad de nieve con tubo Mt. Rose y sondas de avalanchas. Al mismo tiempo se capturaron datos de la superficie del glaciar mediante GPS de precisión geodésico.

3.4.5.3. Objetivos científicos

- Mantención de la estación meteorológica
- Reinstalación del sensor de altura (Sonic range) desde el trípode de la AWS a un soporte independiente
- Reinstalación de balizas de 10 metros para balance de masa
- Mediciones con GPS cinemático de la superficie glaciar
- Mediciones de densidad y espesor de nieve

3.4.5.4. Integrantes participantes en la campaña a terreno

Daniela Carrión (CECS), Camilo Rada (CECS), Pablo Zenteno (CECS), Cristobal Cox (DGA), Pablo Iribarren (DGA) y Alexis Segovia (DGA).

3.4.5.5. Duración

Los trabajos tuvieron una duración de 7 días partiendo desde la ciudad de Valdivia el día 28/09/2009 y regresando el día 05/10/2009.

3.4.5.6. Materiales utilizados

A continuación se enumeran los materiales utilizados durante la campaña de terreno:

- 10 Balizas de PVC de 10 m
- 3 Receptores GPS JAVAD
- 2 Baterías 12 V / 18Ah
- 1 Taladro a vapor Heucke
- 2 sondas para medición de profundidad de nieve
- 1 tubo Mt. Rose
- Un computador portátil para descarga de datos
- Herramientas para instalación de Estación Meteorológica
- 2 Baterías 12 V / 18Ah y 4 baterías de 2000 mAh
- Equipo de alta montaña

3.4.5.7. Logística

Se accedió al área de estudio en camioneta 4x4 hasta el sector de faenas de La Confluencia de la empresa hidroeléctrica La Higuera. Posteriormente se coordinó para la mañana siguiente el arriendo de 5 mulas y dos caballos con 2 arrieros para ayudar a portear los equipos sobre la morrena dónde se instala el campamento base a una distancia aproximada de 4 km hasta el frente del glaciar debido a la abundante cobertura de nieve.

3.4.5.8. Resultados de las actividades realizadas

Se encontró la estación meteorológica casi en su totalidad cubierta por nieve (Figura 3.23 y 3.24). Se procedió a excavar un metro y medio de nieve para extraer la estación meteorológica junto al pluviómetro (Figura 3.25). Luego se procedió a tomar los datos y a cambiar de soporte el sensor de altura de nieve.

En forma simultánea a estos trabajos se efectuaron durante todos los días mediciones sobre la superficie del glaciar con dos equipos GPS JAVAD en modo cinemático (Figura 3.26), intentando en lo posible repetir los recorridos realizados en terrenos anteriores. Complementariamente se realizaron sondeos de profundidad de nieve y determinación de densidad de nieve con tubo Mt. Rose.



Figura 3.23. Estado en que se encontró la estación meteorológica.



Figura 3.24. Estado en que se encontró el pluviómetro.



Figura 3.25. Excavación de la estación meteorológica (1,5 m de nieve).

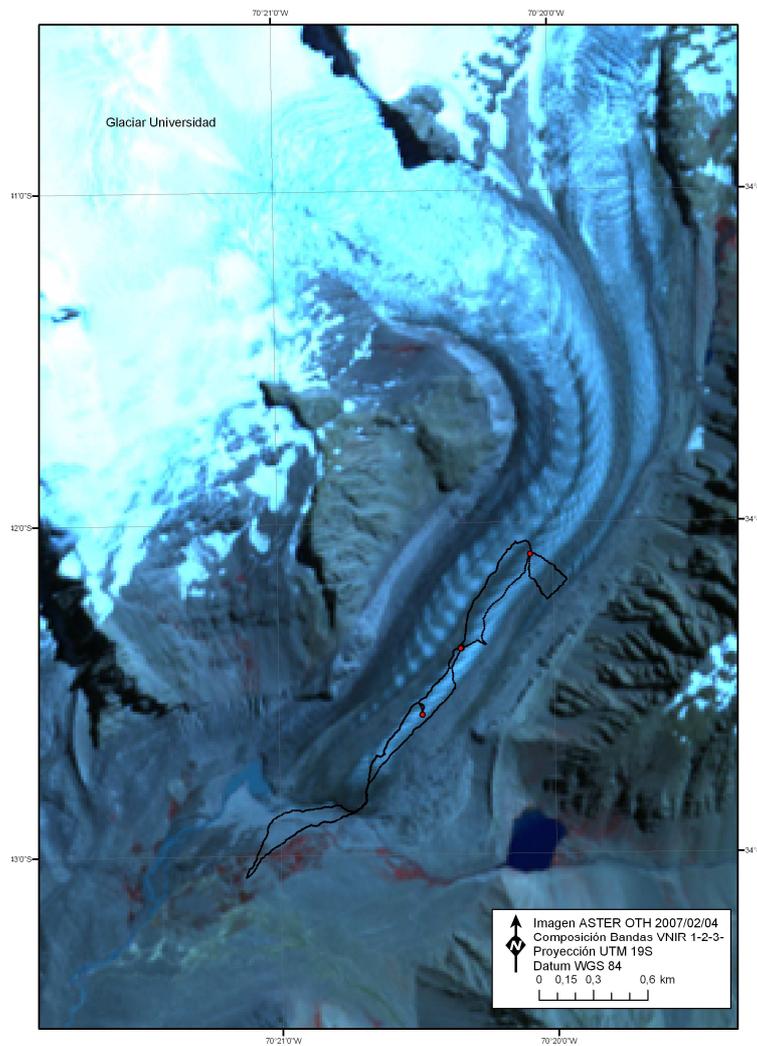


Figura 3.26. Imagen satelital ASTER mostrando el glaciar Universidad. Los puntos rojos indican la ubicación de las balizas medidas. La línea en negro muestra los recorridos realizados sobre el glaciar con el receptor GPS JAVAD.

Se reinstalaron 3 balizas (Nº 2, 4 y 7) de 10 metros a una profundidad de 9.5 metros (Tabla 3.10 y Figuras 3.26 y 3.27). No se encontraron balizas instaladas previamente.

Tabla 3.10. Balizas instaladas en glaciar Universidad.

Baliza Nº	Altura original (m)	Altura sobre superficie glaciar (cm)	Altura antena GPS (cm)	Fecha de instalación
2	10	50	54	30/09/2009
4	10	48	48	02/10/2009
7	10	57	60	03/10/2009



Figura 3.27. Perforación con taladro Heucke para instalación de Baliza Nº 7 a 2940 m s.n.m.

Se realizó una medición de GPS en un bloque errático ubicado ($34^{\circ} 41' 20''$ / $70^{\circ} 19' 50''$) en la morrena medial sobre el glaciar Universidad (Figura 3.28). Aprovechando la excavación de la estación meteorológica se realizó la descripción general cualitativa de los lentes de hielo en el perfil estratigráfico de la nieve (Figura 3.29). La estación meteorológica quedó funcionando plenamente, incluyendo los sensores de altura y pluviómetro (Figuras 3.30, 3.31 y 3.32).



Figura 3.28. Bloque errático posicionado con GPS JAVAD como referencia para futuras mediciones de velocidad superficial del glaciar.



Figura 3.29. Perfil estratigráfico en la nieve en el lugar de excavación de la AWS.

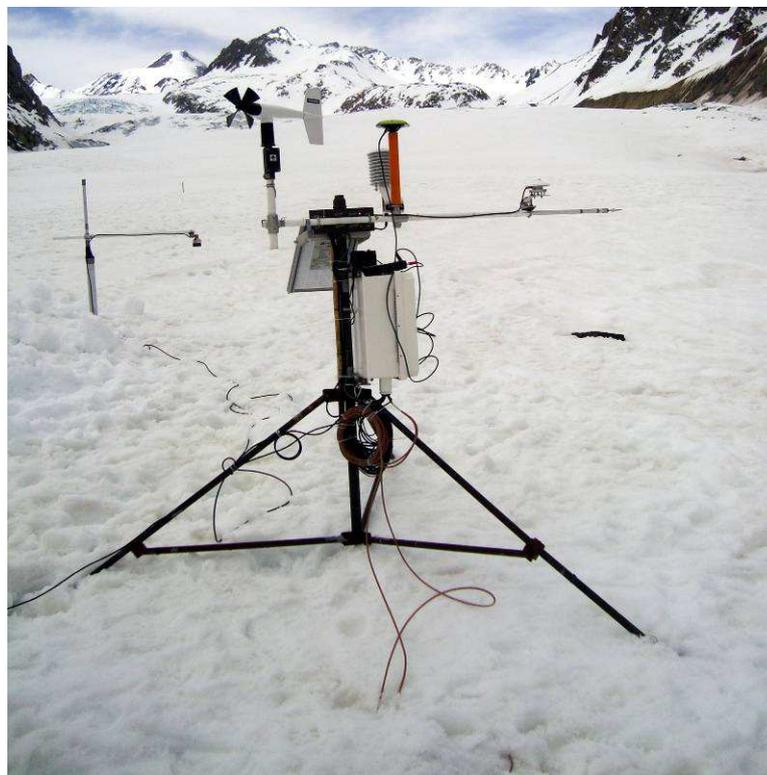


Figura 3.30. Estado en que se dejó funcionando la estación meteorológica. En segundo plano se observa el sensor de altura.



Figura 3.31. Estado en que se dejó funcionando el sensor de altura en perfil independiente de 4 m de altura. El sensor queda a una altura medida de 79,7 cm.



Figura 3.32. Mantenimiento del pluviómetro. Altura medida 1,98 m.

3.4.5.9. Dificultades técnicas

La abundante cobertura de nieve impidió realizar un campamento cercano al frente del glaciar teniendo que alargar las jornadas de trabajo. Se presentó un error en la memoria de almacenamiento de la Estación Meteorológica, impidiendo la correcta descarga de los datos. Debido a problemas de alimentación y memoria, se perdieron datos en dos periodos; entre el 9 de Mayo y el 26 de Junio y entre el 3 de Septiembre y el 1 de Octubre. El taladro a vapor Heucke trabajó muy lentamente debido a las bajas temperaturas y a la falla en uno de sus quemadores.

3.4.5.10. Conclusiones

Fue posible realizar todas las tareas de mantención de la Estación Meteorológica quedando completamente operativa. Se logró instalar en total solamente 3 balizas de 10 metros de largo para efectuar mediciones del derretimiento de la nieve. Nuevamente se mapeo la superficie del glaciar mediante GPS. La campaña se desarrolló con algunas dificultades principalmente dadas por el difícil acceso al glaciar por la cobertura de nieve. No se colectaron datos en la AWS por una falla de poder en la estación.

3.4.5.11. Descripción de actividades por día

3.4.5.11.1. 1^{er} día: 28/09/2009

Traslado desde Valdivia hasta la ciudad de San Fernando para reunirse con el equipo de la DGA. Por la tarde se accede hacia el sector de las faenas de la central hidroeléctrica ubicadas en La Confluencia. Se coordina el arriendo de los mulares y asistencia de arrieros para el día siguiente.

3.4.5.11.2. 2^{do} día: 29/09/2009

Preparación de la carga para los mulares y se inicia la aproximación al glaciar Universidad desde el sector de faenas de la central. Se inicia la ascensión de la morrena con abundante nieve lo que impide el avance de los mulares. Los arrieros dejan los equipos y carga a una distancia de 3 km del frente del glaciar. Se establece el campamento base porteando unos 100 metros de desnivel desde los mulares hacia una zona propicia para el campamento.

3.4.5.11.3. 3^{er} día: 30/09/2009

Se asciende hasta la AWS y se comienzan los trabajos de excavación para realizar la mantención a los distintos sensores. Mediciones sobre la superficie

del glaciar con un sistema GPS JAVAD en modo cinemático. Reinstalación y medición de baliza N° 2.

3.4.5.11.4. 4^{to} día: 01/10/2009

Se continúa excavando para extraer el pluviómetro y se utiliza el taladro Heucke para desinstalar las termocuplas que se encontraban bajo hielo compactado. Reinstalación y medición de baliza N° 2.

3.4.5.11.5. 5^{to} día: 02/10/2009

El Equipo DGA retorna a Santiago. Se terminan las tareas de mantención de la Estación Meteorológica y se realizan nuevas mediciones de profundidad y densidad de nieve con tubo Mt. Rose.

3.4.5.11.6. 6^{to} día: 03/10/2009

Mediciones GPS sobre la superficie del glaciar y en bloque errático. Reinstalación y medición de las balizas N° 4 y 7. Mediciones de densidad con tubo Mt. Rose.

3.4.5.11.7. 7^{to} día: 04/10/2009

Regreso con los mulares hasta el sector de faenas de la central hidroeléctrica. Llegada a Valdivia el 05/10/2009 aproximadamente a las 1:30 am.

3.4.6. Terreno 6: Noviembre 2009

3.4.6.1. Introducción

Durante la tercera semana de Noviembre del año 2009 se realizó la 6^{ta} campaña de terreno al glaciar Universidad conducida por el Centro de Estudios Científicos en el marco del proyecto Desarrollo de una Estrategia Nacional de Glaciares encargado por la Dirección General de Aguas. El glaciar Universidad se encuentra ubicado en la cordillera de Los Andes de la zona central a una elevación de aproximadamente 2.440 m s.n.m. Al igual que en las campañas anteriores se accedió al área de estudio internándose en camioneta hacia el interior de la ciudad de San Fernando por el valle del río San Andrés hacia el sector de La Confluencia.

3.4.6.2. Objetivo general

El objetivo principal consistió en la instalación de la segunda estación meteorológica en la zona de acumulación del glaciar, la instalación de la estación fluviométrica frente al glaciar y la realización de mediciones de espesor de hielo con radio eco sondaje (RES). Además se realizó la mantención de los sensores de la estación meteorológica de la zona de ablación y la recolección de los datos, la medición de la red de balizas para estimar el balance de masa glaciar y velocidad del flujo de hielo, realización de mediciones de densidad y profundidad de nieve con tubo Monte Rose. Al mismo tiempo se capturaron datos de la superficie del glaciar mediante GPS de precisión geodésico.

3.4.6.3. Objetivos científicos

- Instalación de estación meteorológica en la zona de acumulación
- Instalación de estación fluviométrica frente al glaciar
- Realización de mediciones de espesor de hielo con radio eco sondaje (RES)
- Mantención de la estación meteorológica en zona de ablación
- Remedición de balizas de 10 metros para balance de masa y velocidad de flujo de hielo
- Mediciones con GPS cinemático de la superficie glaciar
- Mediciones de densidad

3.4.6.4. Integrantes participantes en la campaña a terreno

Andrés Rivera (CECS), Camilo Rada (CECS), Pablo Zenteno (CECS), Claudio Bravo (CECS), Cristian Galvez y ayudante (Consultor externo).

3.4.6.5. Duración

Los trabajos tuvieron una duración de 7 días partiendo desde la ciudad de Valdivia el día 17/11/2009 y regresando el día 23/11/2009.

3.4.6.6. Materiales utilizados

A continuación se enumeran los materiales utilizados durante la campaña de terreno:

- 2 Receptores GPS JAVAD
- Sistema de radar Bristol

- Osciloscopio Philips-Fluke
- 2 Baterías 12 V / 18Ah
- 1 tubo Mt. Rose
- Un computador portátil para descarga de datos
- Herramientas, materiales e instrumentos para instalación de estación fluviométrica
- 2 Baterías 12 V / 18Ah y 4 baterías de 2000 mAh
- Equipo de alta montaña

3.4.6.7. Logística

Se accedió al área de estudio en camioneta 4x4 hasta el sector de faenas de La Confluencia de la empresa hidroeléctrica La Higuera. El acceso al glaciar se realizó en helicóptero arrendado a la empresa INAER. La carga necesaria para la instalación de la estación fluviométrica (sensores, sacos de cemento, herramientas, etc.) se realizó en sucesivos vuelos de helicóptero mediante el sistema de carga colgante. El personal también fue trasladado en helicóptero al campamento base. Una vez finalizados los trabajos de terreno se realizó la bajada con ayuda de mulares.

3.4.6.8. Resultados de las actividades realizadas

No se pudo instalar la segunda estación meteorológica en la zona de acumulación del glaciar debido a fuertes vientos en superficie que impidieron la operación con seguridad del helicóptero (Figura 3.33). No obstante lo anterior, se pudo acceder a la estación de la zona de ablación, donde se encontró la estación en buen estado y capturando datos (Figura 3.34). En la zona de la estación meteorológica se comenzaron a realizar las primeras pruebas con radar para medición de espesor de hielo. Paralelamente en el campamento base instalado cercano al frente del glaciar, se comienzan las obras para la instalación de la estación fluviométrica, la cual se instala después de tres días de trabajo (Figura 3.35).

Los trabajos glaciológicos consistieron en la medición con GPS geodésico de balizas instaladas en terreno anterior, las cuales fueron encontradas sin problemas. Además se encontraron dos balizas anteriormente instaladas que aparecieron debido al derretimiento de la nieve sobre la superficie glaciar (balizas 1 y 2). Estas balizas también fueron medidas con GPS geodésico con el objetivo de estimar la velocidad de desplazamiento del glaciar. Con este mismo objetivo se realizaron mediciones sobre un bloque errático en una morrena medial anteriormente medida y en la estación meteorológica. En los mismos puntos donde se encontraban las balizas se realizaron mediciones de densidad de nieve con el equipo Mt. Rose. Por último, se realizaron cuatro perfiles de radar (dos longitudinales y dos transversales), con sus respectivos cruces. Estos perfiles se realizaron cercanos a la zona donde se encuentra la

estación meteorológica (Figura 3.36). Todos los desplazamientos sobre el glaciar fueron acompañados por mediciones con GPS en modo cinemático.



Figura 3.33. Zona alta del glaciar donde se aprecian los vientos en superficie.



Figura 3.34. Estación meteorológica, sensor de altura y pluviómetro.



Figura 3.35. Estación fluviométrica instalada cerca del frente del glaciar. Vista aguas abajo.



Figura 3.36. Realización de perfil transversal sobre la superficie del glaciar Universidad.

3.4.6.9. Dificultades técnicas

Las condiciones de viento impidieron la operación con seguridad del helicóptero lo cual impidió la instalación de la estación meteorológica en la zona de acumulación. A pesar del viento existente (40 a 50 km/h) se pudo operar con helicóptero en la zona baja del glaciar y en la zona destinada para la instalación de la estación fluviométrica.

Existieron problemas con el funcionamiento del generador eléctrico utilizado por los consultores para la instalación de la regla limnimétrica. Fue necesario bajar con el soporte para realizar la soldadura donde se encuentran las instalaciones de ICAFAL. Luego, Pablo Zenteno (CECS) presentó problemas de salud por lo que fue evacuado por personal de ICAFAL.

Por último, existieron problemas durante la medición con radar debido a que para operar este tipo de radar son necesarias tres personas. Debido a la ausencia de una de ellas por razones de fuerza mayor, fue necesario arrastrar el emisor, teniendo algunos problemas de conexión y por ende de cortes del envío de la señal en zonas con morrenas y zonas con hielo. Sin embargo la mayor parte de los perfiles fue realizada sobre superficie nival donde no hubo problemas de esta índole.

3.4.6.10. Conclusiones

Se instaló la estación fluviométrica, se realizaron cuatro perfiles de radar que podrán dar una primera estimación del espesor de hielo, se midieron las balizas instaladas y otros elementos (bloque errático y estación meteorológica), se realizaron nuevas mediciones de densidad de nieve con equipo Mount Rose, se rescataron datos de la estación meteorológica y se realizaron nuevas mediciones con GPS en modo cinemático.

No se pudo instalar la estación meteorológica debido a las condiciones de viento, privilegiando la seguridad del personal antes que el intento de instalación de la estación en condiciones muy adversas.

3.4.6.11. Descripción de actividades por día

3.4.6.11.1. 1^{er} día: 17/11/2009

Traslado desde Valdivia a la ciudad de San Fernando.

3.4.6.11.2. 2^{do} día: 18/11/2009

Preparación de logística de terreno en la ciudad de San Fernando, la cual incluye coordinación con piloto de helicóptero, coordinación con consultores

externos, compras de alimentación y materiales, reunión de seguridad con personal de ICAFAL y preparación de sensores para ambas estaciones.

3.4.6.11.3. 3 er día: 19/11/2009

Operación en helicóptero. Andrés Rivera, Camilo Rada y Claudio Bravo son desplazados a la ubicación de estación meteorológica en la zona de ablación del glaciar debido a la imposibilidad de traslado a la zona de acumulación para la instalación. Se realiza la recolección de datos correspondiente a los meses de Octubre y parte de Noviembre (se recolectaron 48 días de registros). Primeras pruebas realizadas con radar.

Se realiza el traslado de consultores externos en compañía de Pablo Zenteno. El campamento base se instala en el mismo lugar donde se instalara la estación fluviométrica.

3.4.6.11.4. 4^{to} día: 20/11/2009

Comienza la instalación de estación fluviométrica. Se prepara la base para la caseta donde se ubica el datalogger, la batería y el panel solar. Por problemas con el generador, Pablo Zenteno, Camilo Rada y los consultores deben bajar para realizar el soldaje de la estructura. Se realiza soldaje gracias a personal de ICAFAL. En el intertanto Pablo Zenteno sufre problema de salud por lo que debe viajar a Santiago. Claudio Bravo y ayudante de consultor instalan la caseta. Posteriormente Claudio Bravo debe bajar para ayudar a portear estructura que carga Camilo Rada. Se vuelve de noche a campamento base.

3.4.6.11.5. 5^{to} día: 21/11/2009

Camilo Rada y Claudio Bravo se dirigen al glaciar. Se realizan mediciones con GPS en modo cinemático y se realizan mediciones de balizas 2, 4 y 7, bloque errático, estación meteorológica y balizas 1 y 2 anteriormente instaladas. Se realiza nueva recolección de datos pudiendo rescatar datos que no se habían podido bajar en anterior terreno con ello se recuperan datos correspondientes a los meses de Julio y Agosto.

Paralelamente consultores realizan instalación de estación fluviométrica consistente en la regla liminimétrica y sensor además de datalogger y fuente de poder. Queda pendiente instalación de panel solar.

3.4.6.11.6. 6^{to} día: 22/11/2009

Consultores terminan instalación de estación fluviométrica (precisamente se hacen modificaciones a programa del datalogger). Aproximadamente a mediodía los consultores bajan.

Claudio Bravo y Camilo Rada se dirigen al glaciar para realizar mediciones de espesor de hielo con radar. Se realizan cuatro perfiles en la zona de ablación del glaciar, dos de ellos longitudinales y dos transversales, con los respectivos cruces para estimar errores.

3.4.6.11.7. 7 to día: 23/11/2009

Llegan mulares, se realiza la carga de ellos y se procede a la vuelta. Se realiza la vuelta a la ciudad de Valdivia.

3.4.7. Terreno 7: Diciembre 2009

3.4.7.1. Introducción

Durante la primera semana de Diciembre del año 2009 se realizó la séptima campaña de terreno al glaciar Universidad conducida por el Centro de Estudios Científicos en el marco del proyecto Desarrollo de una Estrategia Nacional de Glaciares encargado por la Dirección General de Aguas. El glaciar Universidad se encuentra ubicado en la cordillera de Los Andes de la zona central a una elevación de aproximadamente 2.440 m s.n.m. Se accedió al área de estudio internándose en camioneta hacia el interior de la ciudad de San Fernando por el valle del río San Andrés hacia el sector de La Confluencia para ingresar a la zona de acumulación del glaciar en helicóptero.

3.4.7.2. Objetivo general

El objetivo principal consistió en la instalación de la segunda estación meteorológica en la zona de acumulación del glaciar. Además se realizó la mantención de los sensores de la estación meteorológica de la zona de ablación y la recolección de los datos. Al mismo tiempo se capturaron datos de GPS de precisión geodésico en la instalación.

3.4.7.3. Objetivos científicos

- Instalación de estación meteorológica en la zona de acumulación
- Mantención de la estación meteorológica en zona de ablación
- Mantención de la estación fluviométrica en el frente del glaciar

3.4.7.4. Integrantes

Camilo Rada (CECS), Pablo Zenteno (CECS)

3.4.7.5. Duración

Los trabajos se realizaron partiendo desde la ciudad de San Fernando el día 09/12/2009 y se finalizaron el mismo día.

3.4.7.6. Materiales utilizados

A continuación se enumeran los materiales utilizados durante la campaña de terreno:

- 2 Receptores GPS JAVAD
- Un computador portátil para descarga de datos
- Materiales y herramientas para instalación de estación meteorológica
- Taladro a vapor Heucke
- 2 Baterías 12 V / 18Ah y 4 baterías de 2000 mAh
- Equipo de alta montaña

3.4.7.7. Logística

Se accedió al área de estudio en camioneta 4x4 hasta el sector de faenas de La Confluencia de la empresa hidroeléctrica La Higuera. El acceso al glaciar se realizó en helicóptero arrendado a la empresa ALPHA (Figura 3.37). La carga necesaria para la instalación de la estación meteorológica se realizó en 3 vuelos.

3.4.7.8. Resultados de las actividades realizadas

Se instaló la segunda estación meteorológica en la zona de acumulación del glaciar (Lat. -34.64, Lon. -70,32, 3.626 m s.n.m) (Figura 3.38). Se pudo acceder a la estación de la zona de ablación donde se encontró la estación en buen estado pero levemente inclinada y se descargaron los datos (Figura 3.39). Se descargaron los primeros datos de la estación fluviométrica (Figura 3.40).

- 09:05 am inicio de perforación con taladro a vapor Heucke
- 14:51 pm se finaliza de instalar los sensores. La calibración de los sensores se finaliza a las 15:30 pm.
- La *altura del mástil* de la estación meteorológica queda a 2,93 m.
- *Altura antena GPS*: 2,26 m
- *Hora inicio GPS* 14: 52 pm. *Hora término GPS* 15:50 pm.

- *Altura albedómetro* medida desde su base metálica: 1,83 m
- *Altura sensor de temperatura* del aire: 2,02 m
- *Altura anemómetro*: 3,13 m
- *Altura del Sonic ranger en zona de acumulación*: 2,91 m
- *Altura del Sonic ranger en zona de ablación*: 2,93 m

3.4.7.9. Dificultades técnicas

Al llegar al sector de La Confluencia se impidió el acceso debido a la falta de coordinación de una nueva empresa de seguridad (K.P.S.) que se encuentra operando en las obras de HydroChile. No obstante el leve retraso, se realizaron los trabajos bajo condiciones excepcionales sin presentarse ningún tipo de dificultad técnica.

3.4.7.10. Conclusiones

Se instaló la estación meteorológica. Se descargaron los datos de la estación meteorológica en la zona de acumulación. Se descargaron los datos de la estación fluviométrica.



Figura 3.37. Zona de acumulación del glaciar.



Figura 3.38. Instalación de estación meteorológica.

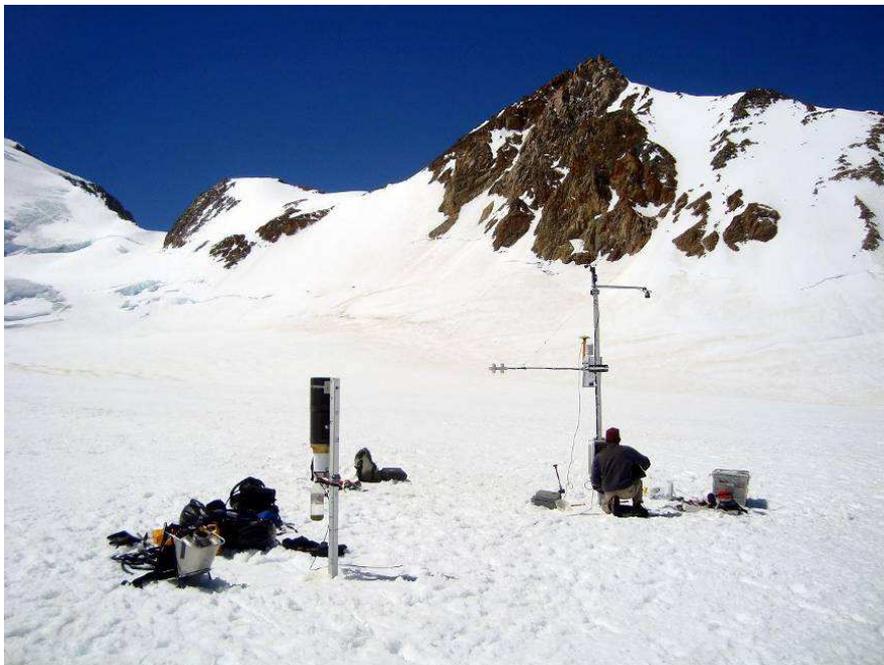


Figura 3.39. Estación meteorológica en zona de acumulación.



Figura 3.40. Estación meteorológica en zona de ablación.

3.5. PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS PRELIMINAR DE DATOS OBTENIDOS EN TERRENO

3.5.1. Glaciar Universidad

3.5.1.1. Cambios de elevación entre 2000 y 2009

Los cambios de elevación se realizaron comparando dos modelos digitales de elevación disponibles. Se obtuvo el modelo SRTM del año 2000 y se obtuvieron datos realizando mediciones con sistema GPS durante el mes de Marzo del año 2009, donde el hielo se encontraba totalmente descubierto. Estos datos de terrenos fueron procesados y transformados a un formato raster. Las zonas de comparación están acotadas a las zonas de los tracks realizados en el año 2009. La estimación del error se realizó comparando puntos en zonas descubiertas de hielo entre los años de cada modelo digital de elevación. En el caso de la estimación del error con datos SRTM se compararon 2.200 puntos.

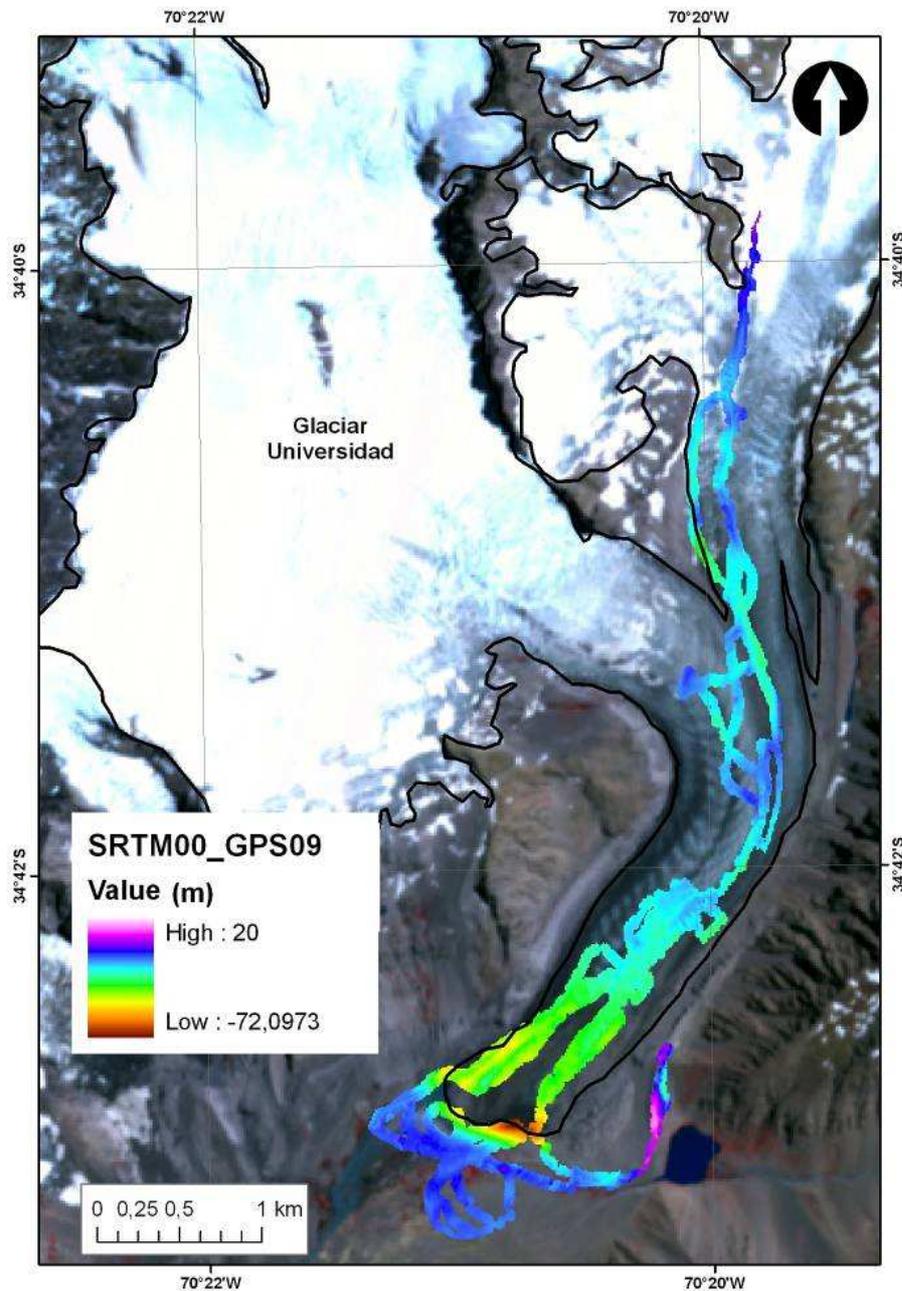


Figura 3.41. Cambios de elevación en el glaciar Universidad (2000-2009).

Para el periodo 2000-2009 se obtuvo un valor promedio de adelgazamiento de -23 ± 10 m. Como se observa en la Figura 3.41 los mayores valores de adelgazamiento se concentran en la zona del frente del glaciar y en algunos márgenes del glaciar, en zonas de mayor altitud. Se obtuvo una tasa anual promedio de -2 ± 1 m/a.

En la Figura 3.42 se muestra que las tasas anuales de adelgazamiento disminuyen con la altitud del glaciar, sin embargo los valores de cambio de elevación siguen siendo negativos en prácticamente toda la extensión comparada.

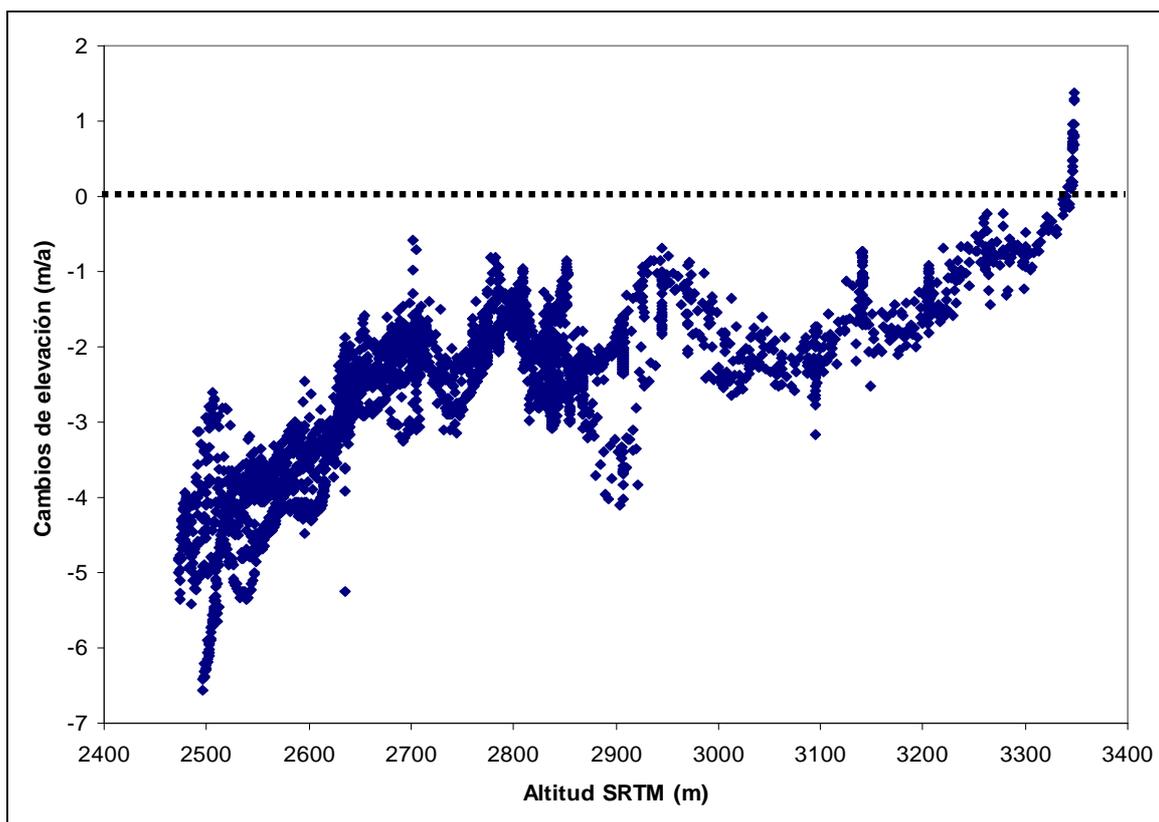


Figura 3.42. Relación entre los cambios de elevación y la altitud.

3.5.1.2. *Balizas instaladas*

De las 7 balizas instaladas originalmente fue posible remedir 4 para obtener valores de ablación entre el periodo Marzo – Mayo y tres balizas para el periodo Septiembre/Octubre - Noviembre. En la Tabla 3.11 se aprecian valores negativos para las cuatro balizas lo que denota la ablación ocurrida en el mes de Abril del año 2009 y valores negativos para las tres balizas que denotan la ablación ocurrida para los meses de Octubre y Noviembre del año 2009. El promedio es de -115 cm para el primer periodo y -79 cm para el segundo periodo.

Tabla 3.11. Balizas instaladas y comparación.

Baliza Nº	Altura original instalada (cm)	Altura medida (cm)	Diferencia (cm)	Fecha de instalación	Fecha de medición
1	27	127	-100	27/03/2009	08/05/2009
2	20	132	-112	28/03/2009	08/05/2009
3	23	146	-123	28/03/2009	08/05/2009
4	29	154	-125	28/03/2009	08/05/2009
2	50	173	-123	30/09/2009	21/11/2009
4	48	129	-81	02/10/2009	21/11/2009
7	57	90	-33	03/10/2009	21/11/2009

Por otro lado en ambos periodos las balizas y la AWS se midieron con GPS geodésico. Con estos datos se obtuvo, para el primer periodo la velocidad del desplazamiento del hielo (Figura 3.43). La magnitud del desplazamiento se muestra en la Tabla 3.12. Se aprecia que la velocidad del glaciar es mayor a medida que se aumenta la altura de la lengua del glaciar.

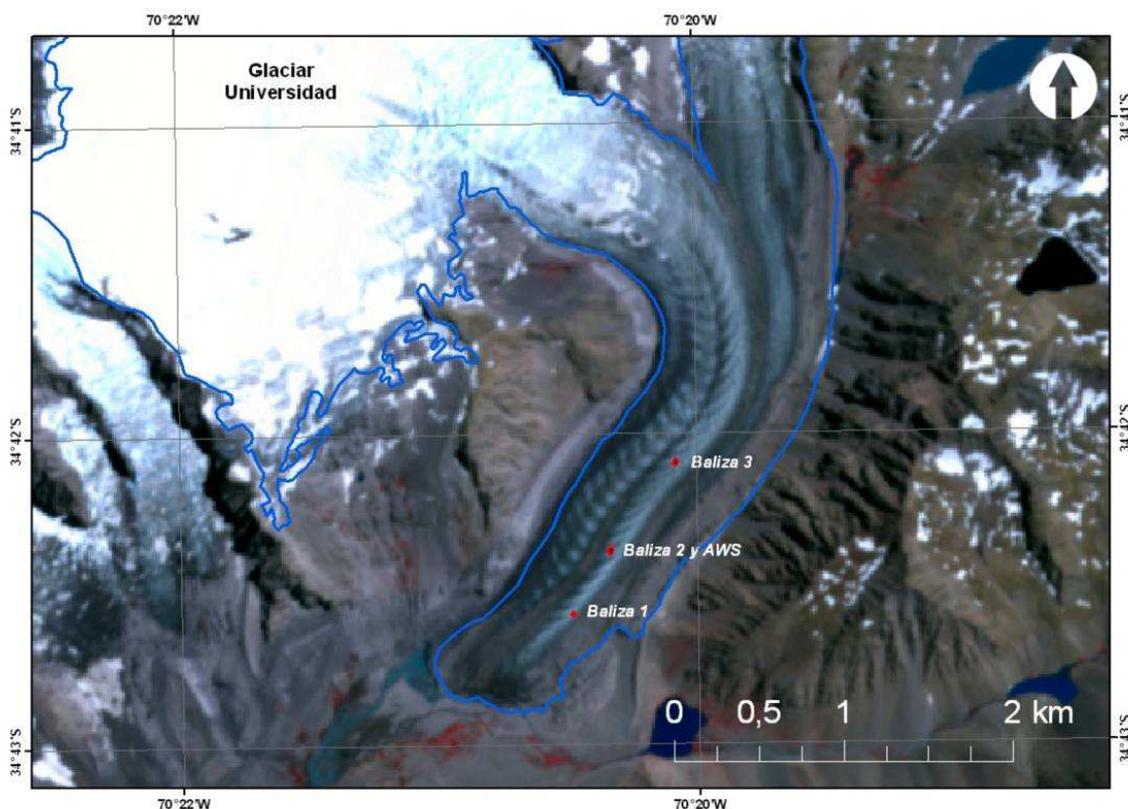


Figura 3.43. Balizas donde se midió velocidad del flujo del hielo del glaciar Universidad.

Tabla 3.12. Desplazamiento de balizas y AWS.

Nombre	Inicio	Final	Desplazamiento (m)	Desplazamiento (m/d)	Angulo azimutal (grados)
Baliza 1	Marzo 27	Mayo 8	5,7	0,13	210
Baliza 2	Marzo 28	Mayo 8	7,1	0,17	210
Baliza 3	Marzo 28	Mayo 8	12,35	0,29	222
AWS	Marzo 27	Mayo 8	7,01	0,16	211
Baliza-AWS	Mayo 8	Octubre 2	22,8	0,15	211

3.5.1.3. Acumulación de nieve y mediciones con Mt. Rose

Durante la campaña de Octubre se realizaron algunas mediciones de densidad de nieve con el equipo Mt. Rose, las que se detallan en la Tabla 3.13. Las mediciones fueron realizadas próximas a balizas instaladas anteriormente.

Tabla 3.13. Mediciones realizadas con equipo Mt. Rose.

Fecha	Peso Tubo Vacio (in eq. a.)	Profundidad de la nieve (in)	Largo de la Muestra (in)	Peso de la Muestra y Tubo (in eq. a.)	Contenido de Agua (in eq. a.)	Densidad de la Nieve (%)	Ubicación
01/10/2009	26,3	56	43	42	15,7	28,04	Baliza 2
02/10/2009	32	53,5	47,5	52	20	37,38	Baliza 4
02/10/2009	26,3	54,5	46,5	47,5	21,2	38,90	Baliza 4
02/10/2009	26	44	26,5	37	11	25,00	Baliza 4
03/10/2009	30	51	37	52	22	43,14	Baliza 7
03/10/2009	26,3	55	36	41	14,7	26,73	Baliza 7
21/11/2009	22	14	13,5	30	8	57,14	Baliza 2
21/11/2009	22	18	16,5	31,5	9,5	52,78	Baliza 2
21/11/2009	23	11	10	29,5	6,5	59,09	Baliza 2
21/11/2009	23	34	30	41	18	52,94	Baliza 3
21/11/2009	23	53	49,5	51,5	28,5	53,77	Baliza 4
21/11/2009	23	53	52,5	52,5	29,5	55,66	Baliza 4
21/11/2009	23	52	49	51	28	53,85	Baliza 4
21/11/2009	23	53	51,5	50	27	50,94	Baliza 7
21/11/2009	23	54,5	50,5	48	25	45,87	Baliza 7
21/11/2009	23	52	41	47	24	46,15	Baliza 7

Tabla 3.14. Acumulación de nieve medida con sonda.

Acumulación	Elevación (m s.n.m.)	Identificación	Latitud	Longitud
>275	2798	A	34°41'35"	70°19'46,7"
208	2804	B	34°41'31,8"	70°19'46,9"
251	2815	C	34°41'28,5"	70°19'47,2"
181	2814	D	34°41'25,2"	70°19'46,5"
>275	2814	E	34°41'22"	70°19'47"
215	2826	F	34°41'17,7"	70°19'48,3"
275	2829	G	34°41'14,5"	70°19'48,6"
244	2839	H	34°41'11,3"	70°19'49,7"
>295	2848	I	34°41'08,4"	70°19'51,4"
167	2861	J	34°41'05,2"	70°19'52,1"
274	2877	K	34°41'02"	70°19'52,5"
>291	2900	L	34°40'58,8"	70°19'53"
288	2918	M	34°40'56,6"	70°19'53,2"
>287	2933	N	34°40'55,6"	70°19'53,4"

También se realizaron algunas mediciones de profundidad de nieve con una sonda (Figura 3.44), detectándose zonas donde la acumulación superó los 295 cm tal como se aprecia en la Tabla 3.14 (el signo > denota acumulaciones mayores al valor dado, debido a que no se pudo medir la profundidad de nieve total). Esta acumulación corresponde a todo el periodo invernal del año 2009 (hasta el 2 de Octubre). En general, la acumulación aumenta con la altitud.

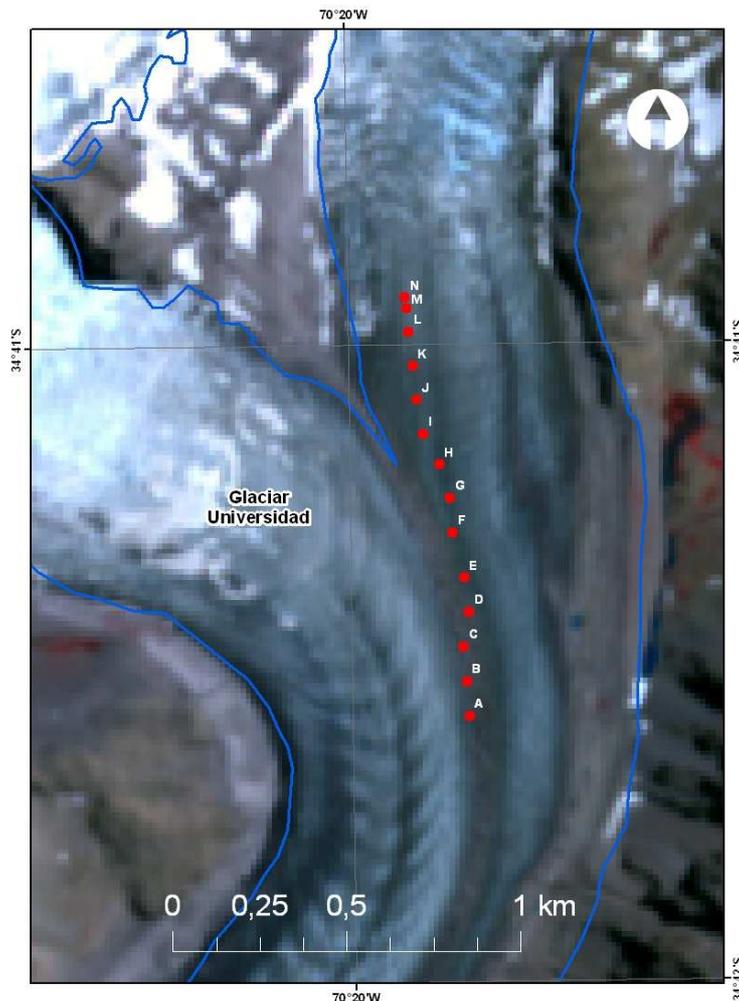


Figura 3.44. Localización de puntos medidos con sonda. Imagen satelital de verano, por lo que no muestra cobertura nivosa medida.

3.5.1.4. Estación Meteorológica Zona de Ablación Glaciar Universidad

Durante las campañas de terreno se extrajeron los datos de la estación meteorológica. Se obtuvieron registros entre los días 28 de Marzo y 9 de Diciembre. Existen algunos vacíos en los datos debido a problemas de alimentación de energía de la estación (entre el 9 de Mayo y 26 de Junio y entre el 3 de Septiembre y 1 de Octubre). La estación meteorológica fue encontrada en general en buenas condiciones, excepto durante el mes de Octubre donde se encontró cubierta por nieve y por lo que se perdieron algunos datos. El pluviómetro, se encontró totalmente inclinado durante el mes de Mayo. Prácticamente durante todo el registro no se obtuvieron datos de precipitación por lo tanto se debe evaluar la utilidad de este tipo de sensor en este ambiente en particular. El resto de los sensores presentan datos para todo los registros. A continuación se presentan algunos ejemplos de los datos obtenidos en la estación meteorológica.

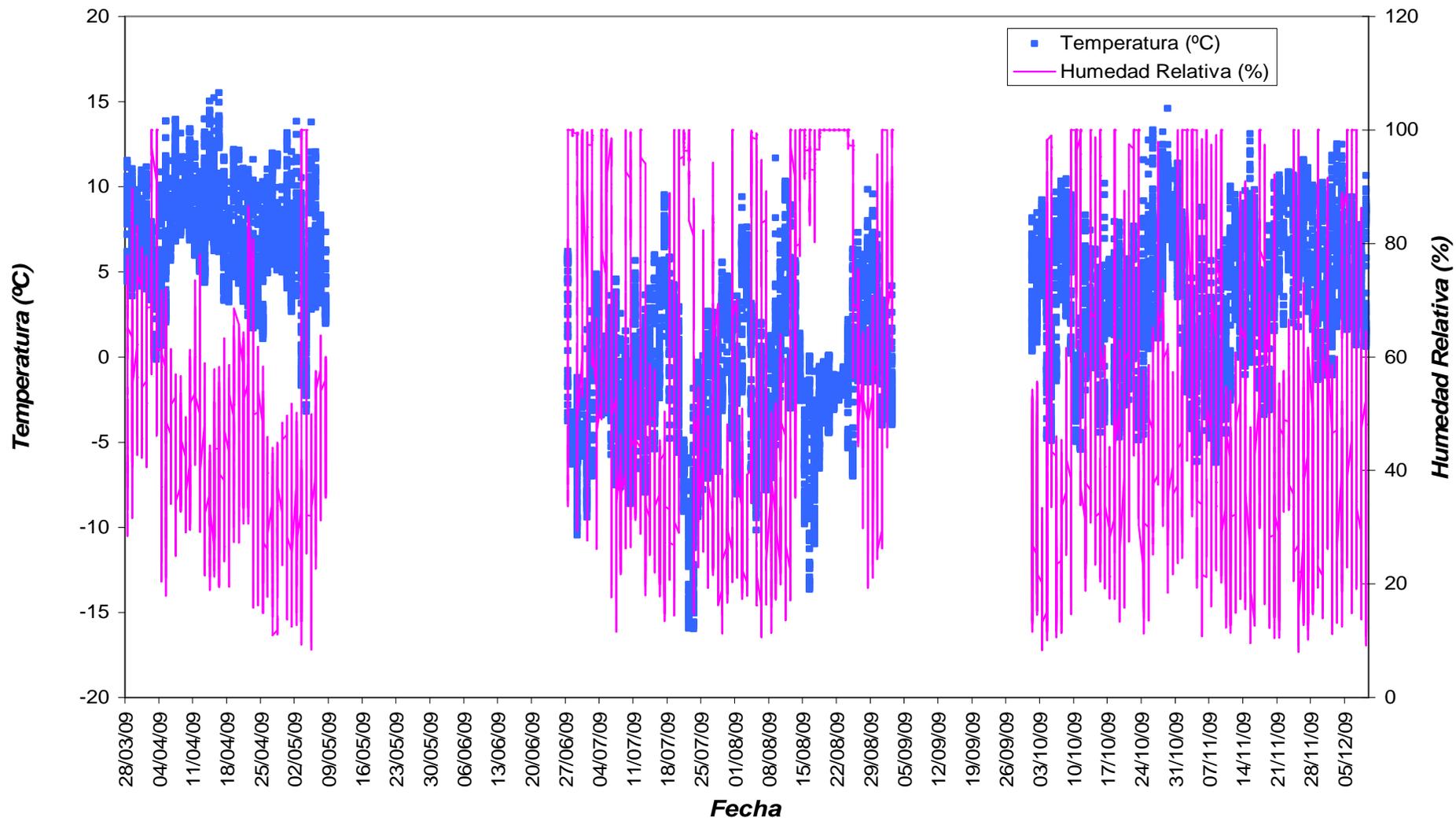


Figura 3.45. Temperatura del aire en azul y humedad relativa en rosado.

En la Figura 3.45 se aprecia la oscilación de las temperaturas con máximas y mínimas diarias. La máxima temperatura registrada corresponde a 15,5 °C obtenida el día 16 de Abril a las 13:15 hrs, mientras la mínima registrada corresponde a -15,97 °C obtenida el día 23 de Julio a las 00:15 hrs. donde se registró además un 70% de humedad relativa.

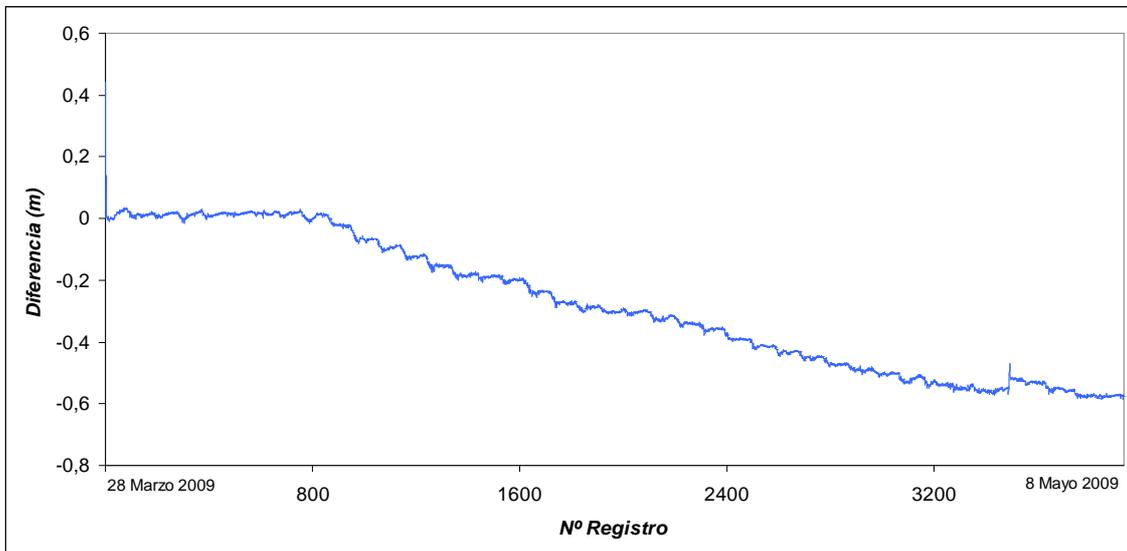


Figura 3.46. Adelgazamiento superficie glaciar.

Con el sensor sónico de altura de nieve SR50A de Campbell Scientific, se obtuvieron los cambios de la superficie glaciar en la zona de ubicación de la estación meteorológica. Como ejemplo para el periodo 28 de Marzo al 8 de Mayo, se aprecia en la Figura 3.46 una tendencia al adelgazamiento de la superficie que llegó a un total acumulado al final del período medido de -0,576 m. Se observa una oscilación diaria en los datos, la cual puede deberse a efectos de la temperatura del sensor sónico que se utiliza para calibrar la altura.

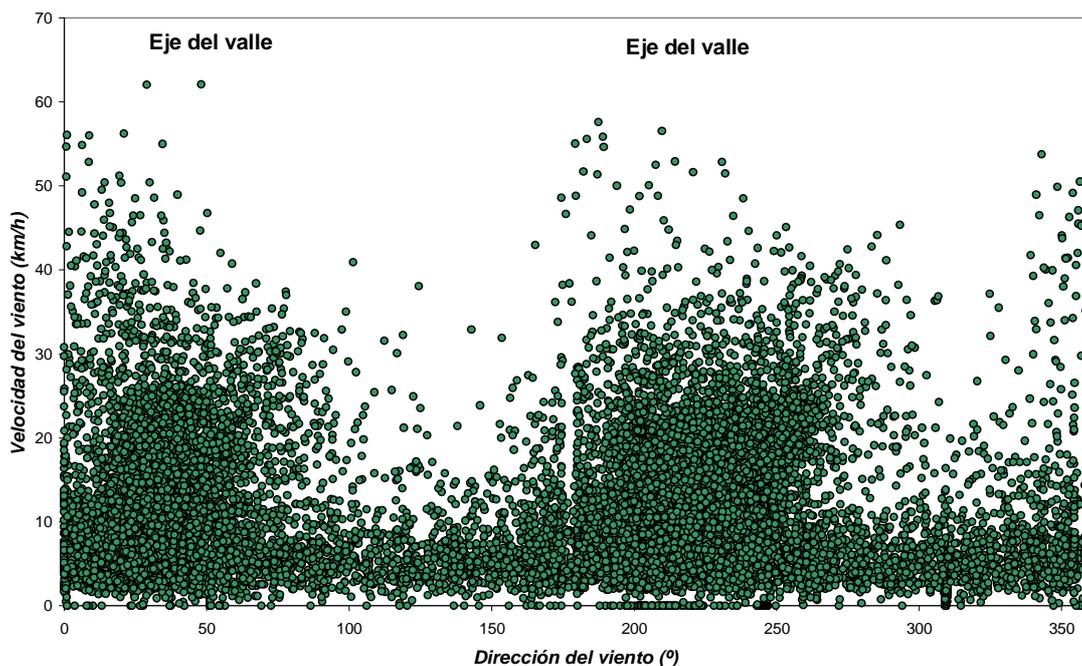


Figura 3.47. Ploteo de la dirección del viento versus velocidad del viento.

En la Figura 3.47, se aprecia que la dirección predominante corresponde a vientos catabáticos con dirección SW y que también corresponden a mayores velocidades. Existe también una componente proveniente desde la zona inferior del valle en dirección a la zona alta (vientos anabáticos con dirección NE), donde sin embargo se registran menores velocidades. La velocidad máxima registrada en promedio cada 15 minutos corresponde a 62,1 km/h el día 14 de Agosto, donde incluso se registro una máxima de 102 km/h

Los datos de radiación solar muestran la oscilación diaria durante el período (28 de Marzo al 9 de Diciembre). En la Figura 3.48 se observa en el primer grupo de datos que corresponde al mes de abril una predominancia de días despejados o con nubosidad parcial. También se aprecia una leve tendencia de disminución de los valores máximos hacia el final del período medido. Durante el segundo periodo existe un mayor número de días con nubosidad, los cuales disminuyen para el tercer periodo y donde además existen máximos en la radiación global.

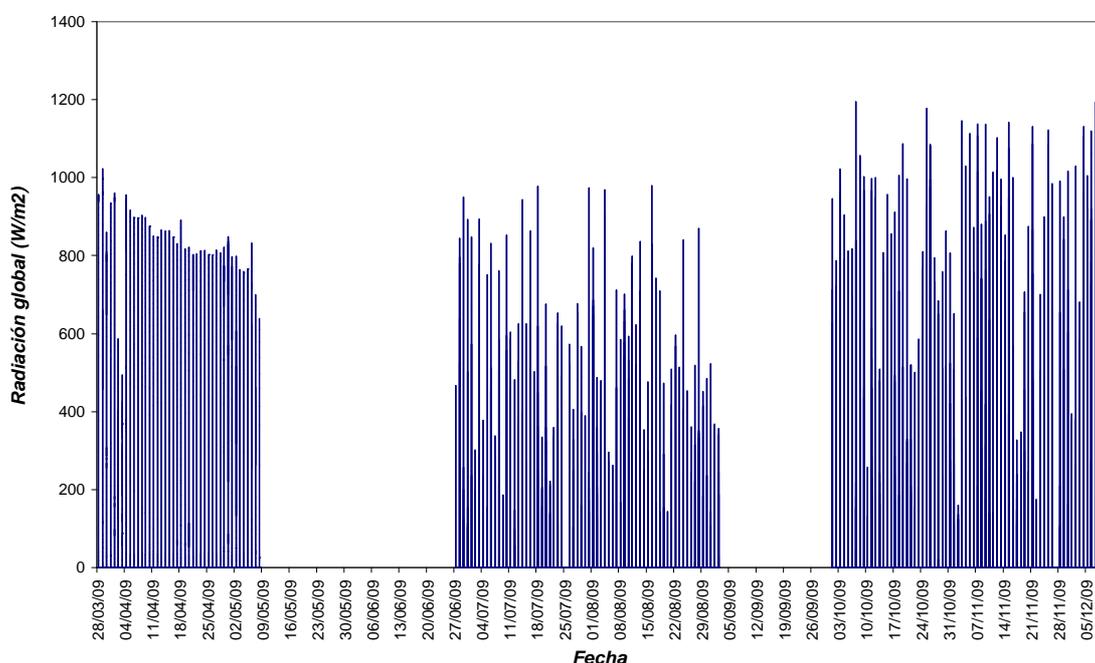


Figura 3.48. Radiación global en el glaciar Universidad 28 de Marzo al 9 de Diciembre de 2009.

3.5.1.5. Modelo de ablación Grado día (Degree day factor)

Con los datos recolectados en el periodo 28 de Marzo al 8 de Mayo se obtuvo una relación entre los grados Celsius acumulados sobre cero y la ablación de la superficie glaciar. Como se aprecia en la Figura 3.49, no existe una buena correlación entre los datos ($R^2=0,2793$) como ya ha sido descrito en otros glaciares de la Zona Centro (Pellicciotti *et al.*, 2008) pero si existe una tendencia lineal en que a mayores grados día, mayor es la ablación. El factor de relación DDF (Degree day factor) es de 3,7 mm eq.a $d^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (considerando la densidad del hielo igual a $0,9 \text{ g/cm}^3$), el cual es más bajo respecto a valores determinados en el glaciar Chico (Campo de Hielo Sur) donde se determinó un valor de 6,5 mm eq.a $d^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (Rivera, 2004) y al determinado en el glaciar Tyndall el cual fue de 11,8 mm eq.a $d^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (Koizumi & Naruse, 1992).

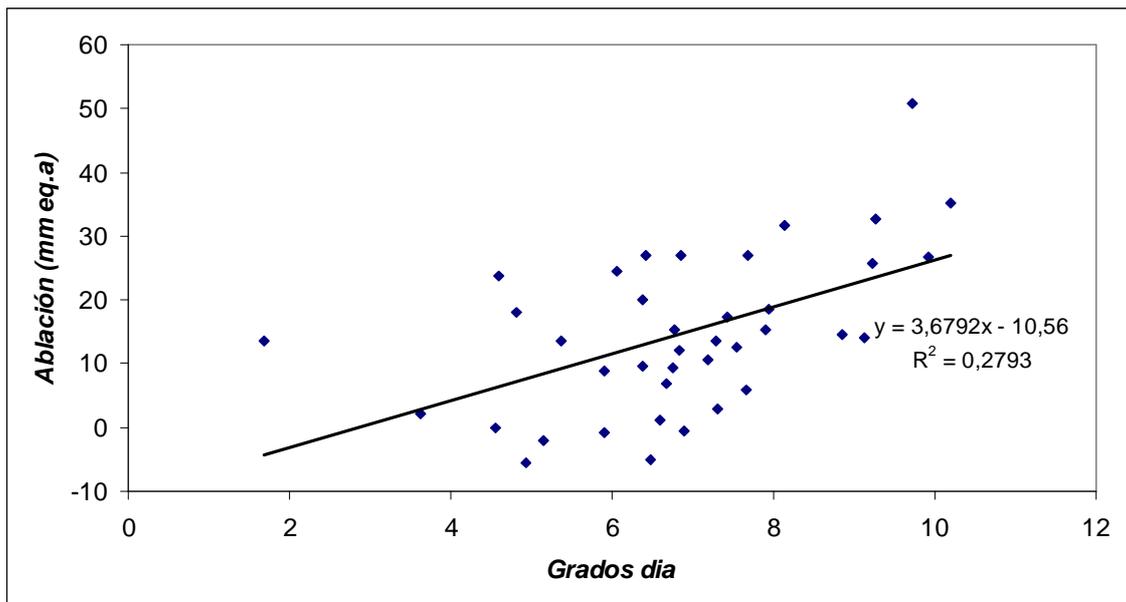


Figura 3.49. Modelo de ablación grado día 28 de Marzo al 8 de Mayo.

La baja correlación entre la ablación y los grados día se debe como describió Pellicciotti *et al.*, (2008), a que el balance de energía del glaciar está dominado por la radiación de onda corta. Para mejorar esta aproximación, se aplicó una aproximación simple para considerar ese factor a través de ETI (Enhanced temperature-index model) dado por la Ecuación 3.1:

$$M = \begin{cases} TF \cdot T + SRF \cdot (1 - \alpha) \cdot I & T > T_T \\ 0 & T \leq T_T \end{cases} \quad \text{Ecuación 3.1}$$

Donde:

M es el rango de ablación (mm eq.a./h), T es la temperatura del aire ($^{\circ}\text{C}$), α es el albedo e I es la radiación de onda corta (W/m^2). Los dos factores empíricos son TF que corresponde al factor de temperatura ($\text{mm d}^{-1} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$) y TRF que corresponde al factor de radiación de onda corta ($\text{m}^2 \text{ mm W}^{-1} \text{ h}^{-1}$). T_T es igual a 1°C que es la temperatura a partir de la cual el glaciar comienza a derretir su superficie.

Tras calibrar los datos se ajustó este modelo a las mediciones de ablación, temperatura y radiación de onda corta obtenidos en la estación meteorológica instalada en el glaciar. La Figura 3.50 muestra los datos de ablación con sus característicos ciclos diarios (en azul), tal como fueron medidos por el sensor Sonic Range instalado en la AWS, y la ablación definida por el modelo con los parámetros ajustados (en rojo).

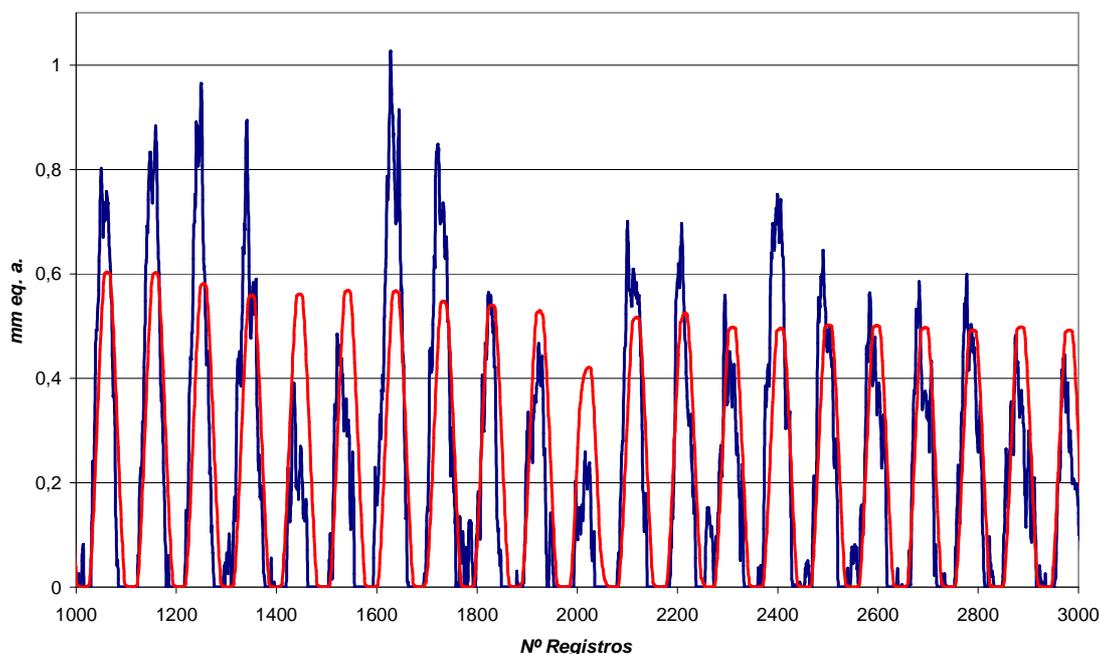


Figura 3.50. Modelo ETI, en el periodo 28 de Marzo al 8 de Mayo.

Los parámetros que mejor ajustan los datos son:

$$TF = 0,000006687 \text{ mm h}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$SRF = 0,00148 \text{ m}^2 \text{ mm W}^{-1} \text{ h}^{-1}$$

Al igual que en Pellicciotti *et al.*, (2008), se utilizó $T_T = 1 \text{ } ^\circ\text{C}$ y el albedo se asumió como constante, igual a 0,25 tal como fue recomendado por Paterson (1994) para hielo ligeramente cubierto de detritos.

Los parámetros se ajustaron para lograr una correspondencia completa con los datos observados de ablación acumulada para el final del período.

Los parámetros muestran que la ablación en el glaciar Universidad depende en mayor medida de la radiación solar respecto a la temperatura, lo cual corresponde a la misma conclusión a la cual llegó Pellicciotti *et al.*, (2008) en el glaciar Juncal.

Como referencia los valores típicos de estos parámetros se observan en la Tabla 3.15.

Tabla 3.15. Valores típicos.

	Alpes	Juncal Norte	Universidad
TF ($\text{mm h}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)	0,04	-0,01	0,000007
SRF ($\text{mm W}^{-1} \text{ h}^{-1}$)	0,0094	0,0106	0,0015

3.5.1.6. Estación Meteorológica Zona de Acumulación Glaciar Universidad

Esta estación fue instalada durante el séptimo terreno, el 9 de Diciembre de 2009. No se tienen registros importantes de esta estación, sino los correspondientes a un par de horas durante la instalación. La estación fue instalada a 3.626 m s.n.m. en las coordenadas $-34,64^{\circ}$ S y $-70,32^{\circ}$ W.

3.5.1.7. Estación Fluviométrica Glaciar Universidad

Esta estación fue instalada en el mes de Noviembre, durante el 6to terreno. Fue posible obtener datos durante el 7mo terreno, los cuales se aprecian en la Figura 3.51, donde se observan la oscilación diaria del caudal y una tendencia al aumento del caudal durante el periodo, en concordancia con el aumento de las temperaturas y por ende el derretimiento casi total de la cobertura nival en la zona de ablación observada por los operadores.

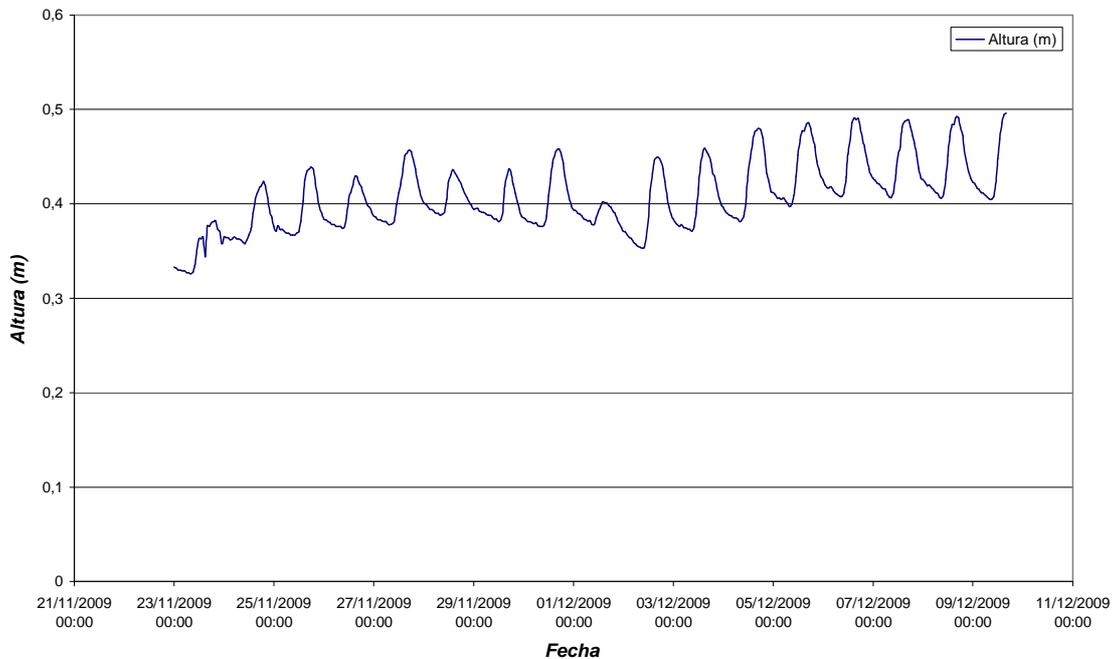


Figura 3.51. Datos de la estación fluviométrica mostrando el aumento progresivo del caudal en período de deshielos.

3.5.1.8. Espesor de Hielo

Se realizaron cuatro perfiles de radar en la zona de ablación del glaciar, entre la localización de la estación meteorológica en la parte baja y la localización de la baliza 3 en la parte alta. Se utilizó el radar Bristol el cual presenta una potencia máxima instantánea de salida de 9 kW y un voltaje de salida máximo de 680 Vpp (Rivera *et al.*, 2001). El receptor de la señal corresponde al osciloscopio Philips-Fluke modelo PM-97 con ancho de banda de 50 MHz y almacenamiento digital de los datos. La distancia entre las antenas fue de 11,56 m. Los perfiles fueron realizados con mediciones GPS

para localizar con precisión métrica (mejor que un metro) la ubicación de estos perfiles. El espesor máximo medido alcanzó a 237 m. En la Figura 3.52 se aprecia la localización de dos de los perfiles principales (uno longitudinal A-B, y uno transversal C-D). Ambos perfiles topográficos (corregidos por GPS), incluyen la interpretación de la topografía subglacial. Esta topografía subglacial no ha sido sometida a migración, y por lo tanto sus errores se estiman que fluctúan entre un 5 y 7% del espesor medido (Por ejemplo el espesor máximo es de 237 ± 14 m).

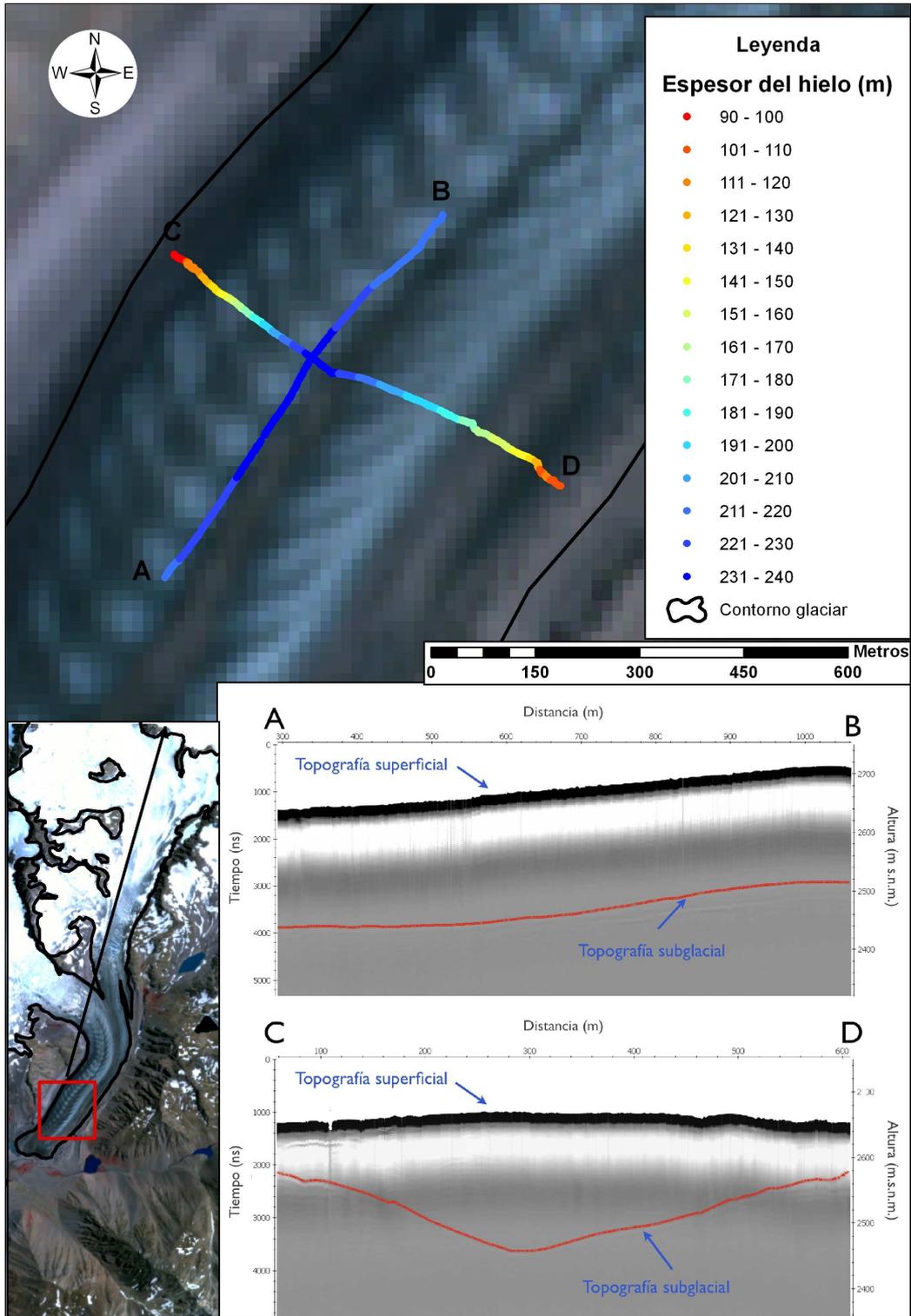


Figura 3.52. Perfiles topográficos con espesores de hielo en el Glaciar Universidad.

3.5.2. Glaciar Mocho

3.5.2.1. Introducción

El Centro de Estudios Científicos (CECS) comenzó en mayo de 2003 un programa de monitoreo de balance de masa en el glaciar sur-oriental del volcán Mocho-Choshuenco mediante el método glaciológico. El objetivo de este programa fue establecer un monitoreo sistemático de un glaciar ubicado en un sector sin actividad volcánica significativa en la zona sur de Chile, y asimismo poder aprovechar el sitio como glaciar piloto para desarrollar diversos experimentos y estudios glaciológicos.

El volcán Mocho-Choshuenco se compone de dos conos volcánicos separados, el Mocho y el Choshuenco, ubicados en las coordenadas promedio de 39° 56' de latitud Sur y 72° 02' de longitud Oeste (Figura 3.53). La última erupción registrada en este complejo volcánico ocurrió en 1864 (González-Ferrán, 1995). Un amplio sector somital de ambos conos está cubierto por una superficie glaciar de 16,9 km² (Rivera *et al.*, 2005).

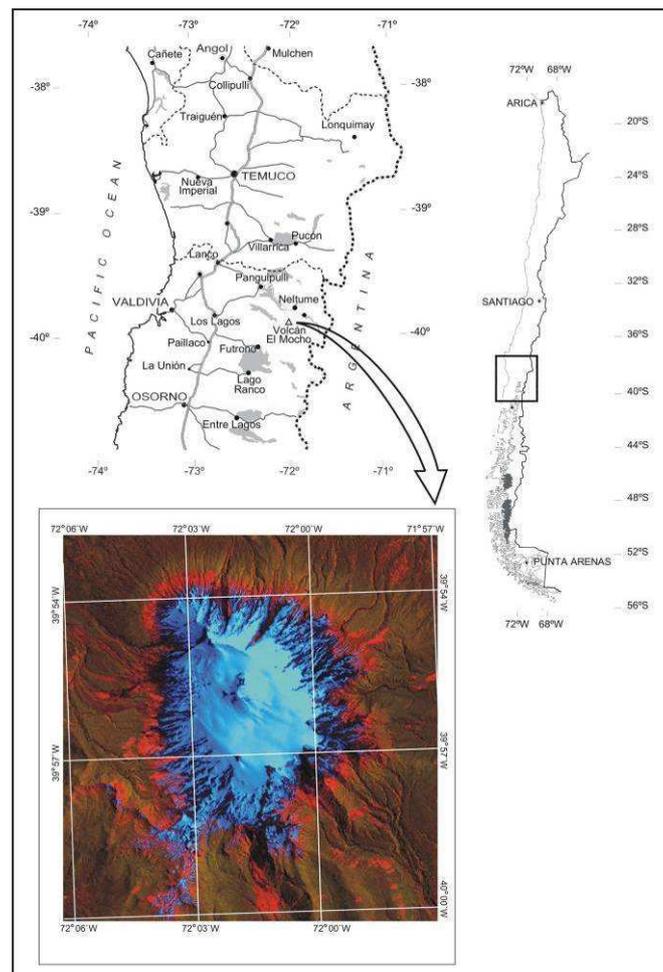


Figura 3.53. Localización geográfica del Volcán Mocho-Choshuenco.

Al igual que la mayor parte de los glaciares andinos, el glaciar Mocho-Choshuenco ha retrocedido en las últimas décadas, disminuyendo de 28,4 km² en 1976 a 16,9 km² en 2003 (Rivera *et al.*, 2005) (Figura 3.54). A pesar de la pérdida areal de masa, no se ha medido un adelgazamiento significativo en el glaciar Mocho-Choshuenco entre 1961 y 2005 (Rivera *et al.*, 2006).

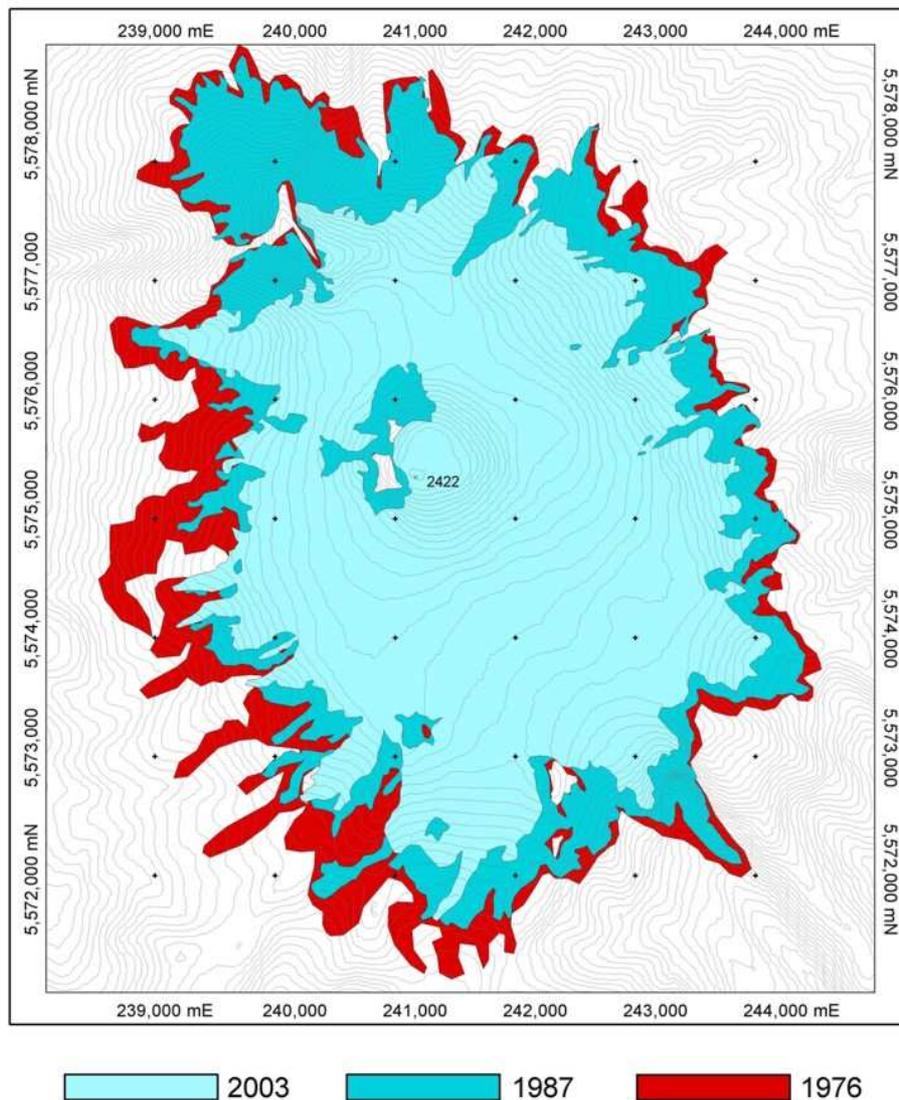


Figura 3.54. Variaciones de áreas del glaciar en el Volcán Mocho – Choshuenco (Rivera *et al.*, 2005).

El sector con mayor área y volumen de hielo es la zona sur-oriental del volcán Mocho-Choshuenco, donde el hielo cubre una amplia caldera volcánica de una superficie de 5,1 km². La delimitación de esta superficie se realizó a partir del modelo digital de terreno SRTM a resolución espacial de 90x90 m, una imagen Aster del 24 de marzo de 2003 (Figura 3.53) y datos GPS adquiridos *in situ*, delineando así el área cubierta por hielo de la subcuenca que drena hacia el Río Mocho (Figura 3.55) (Rivera *et al.*, 2005). Es justamente en este glaciar sur-oriental, que denominamos glaciar Mocho, donde el CECS mantiene un programa de balance de masa con mediciones en 15 balizas (Figura 3.55), distribuidas entre el frente de la lengua norte, a cota 1723 m s.n.m y el cono somital (cota 2416 m s.n.m., pocos metros bajo la cumbre).

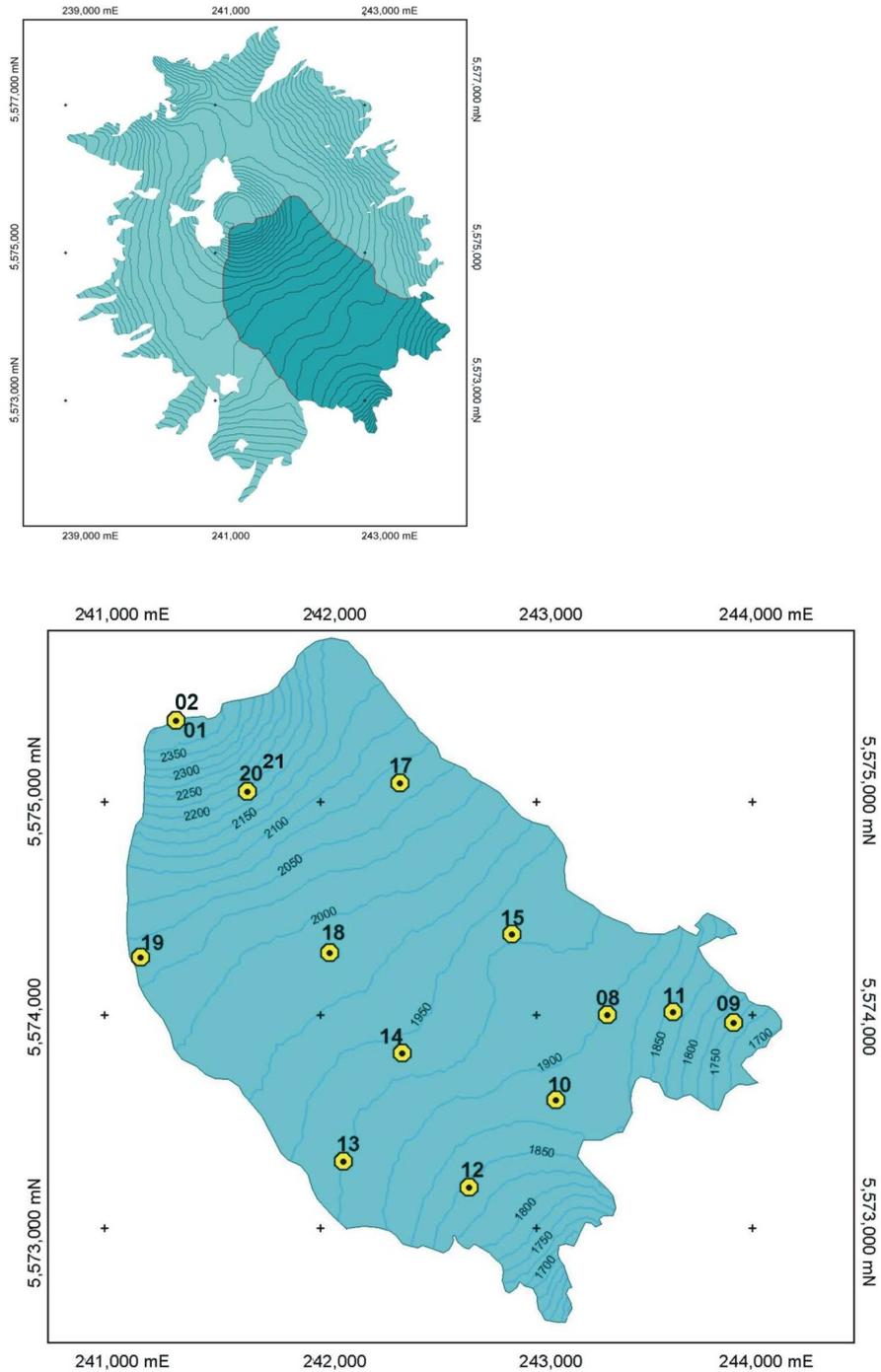


Figura 3.55. Red de 15 balizas para monitoreo de balance de masa. Las balizas 1, 2 y también la 20, 21 están separadas por unos 20 m de distancia, por lo cual aparecen ubicadas en el mismo punto debido a la escala del mapa. El recuadro superior indica la ubicación de la subcuenca suroriental del volcán Mocho.

Los resultados del balance de masa del año hidrológico 2003/2004 y 2004/2005 son de $-0,88 \pm 0,18$ m equivalente en agua (eq.a.) (+2,59 m eq.a. en invierno y -3,47 m eq.a. en verano) y $+0,37 \pm 0,07$ m eq.a. (+4,04 m eq.a. en invierno y -3,73 eq.a. en verano), según Rivera *et al.*, (2005) y Bown *et al.*, (2007), respectivamente. La diferencia entre el balance negativo de 2003/2004 y el balance positivo de 2004/2005 obedece probablemente a la variabilidad en la acumulación invernal. Se está trabajando en la estimación del balance de masa de los años 2005-2008 (Stephanie Joyce, comunicación personal).

3.5.2.2. Reporte de balance de masa año 2009

El año 2009, en el marco del proyecto "Desarrollo de una Estrategia Nacional de Glaciares" encargado al CECS por la Dirección General de Aguas, se reforzó el estudio del balance de masa del glaciar Mocho, implementando visitas a terreno con periodicidad mensual, reemplazando las balizas de colihue por balizas de aluminio (Figura 3.56), y preparando un sitio cercano al frente del glaciar para la instalación de una estación hidrológica.



Figura 3.56. Baliza de aluminio en el glaciar Mocho.

Tabla 3.16. Campañas de terreno realizadas en la temporada 2009.

Campaña	Fecha	Fecha	Observaciones
N°	Inicio	Término	
36	02-01-2009	04-01-2009	Densidad en B18
37	07-02-2009	08-02-2009	Densidad en B1 y B18
38	07-03-2009	09-03-2009	Densidad en B1
39	09-04-2009	11-04-2009	Densidad en B1
40	26-04-2009	26-04-2009	No se midió densidad
41	28-05-2009	29-05-2009	Densidad en B19
42	09-07-2009	09-07-2009	Densidad en B18
43	22-07-2009	24-07-2009	Densidad en B1 y B18
44	01-09-2009	02-09-2009	Densidad en B1 y B18
45	06-10-2009	07-10-2009	Densidad en B1 y B18
46	10-11-2009	10-11-2009	No se midió densidad
47	11-12-2009	11-12-2009	Densidad en B1 y B18
48	06-01-2010	07-01-2010	Densidad en B1 y B18

Desde el 2 de enero de 2009 hasta el 6 de enero del año 2010, se realizaron 13 campañas, desde la #36 a la #48 (Tabla 3.16), siendo la campaña #1 la primera efectuada al inicio del programa de monitoreo, en mayo de 2003. Los datos medidos en cada campaña incluyen tipo de baliza (principalmente PVC en secciones de 1,5 m para el verano (Figura 3.57), (principalmente colihues en el invierno, y a partir de mediados de 2009 aluminio), altura de la baliza con respecto a la superficie del glaciar, tipo de superficie (nieve o hielo), inclinación de cada baliza si se encontró inclinada, tiempo de medición de datos GPS de doble frecuencia en cada baliza, integrantes de la campaña y observaciones misceláneas. En adición a las alturas de balizas, en la baliza #18 (2013 m s.n.m.) y en la baliza #1 (2416 m s.n.m) se realizan mediciones de densidad en pozos de nieve (Figura 3.58) hasta una profundidad habitual de 1 m, cuyos datos procesados se presentan en la Tabla 3.17.



Figura 3.57. Control de Balizas de ablación (PVC) en el Glaciar Mocho.

A partir de los datos originales de las alturas de balizas se calculan las diferencias de alturas de balizas que representan acumulación (+) o ablación (-). Para calcular el balance de masa entre cada época de medición se ponderan las diferencias de altura con el promedio de la densidad de nieve entre dos épocas de medición, asumiendo que la densidad de la baliza #1 es válida para las balizas #1 y #2 del sector somital, y la densidad de la baliza #18 es válida para las restantes balizas. En el caso de presencia de hielo en superficie, típico de la época de ablación en los sectores bajos del glaciar, se consideró una densidad de $0,9 \text{ g/cm}^3$.



Figura 3.58. Muestras de densidad de nieve en pozo.

Tabla 3.17. Promedios de densidad de nieve para el año 2009 correspondiente a la columna de nieve expresada en m. B18 y B1 son las balizas mencionadas en el texto.

Fecha DD.MM.AA	B18		B1		Observaciones
	Densidad g/cm ³	Profundidad M	Densidad g/cm ³	Profundidad m	
03.01.09	0,56	1,00			
07.02.09	0,55	1,00			
08.02.09			0,58	1,00	
07.03.09			0,58	1,00	
09.04.09			0,56	0,40	
28.05.09	0,35	0,20			Pozo efectuado en B19
09.07.09	0,41	1,00			
22.07.09	0,43	1,00			
24.07.09			0,40	0,90	
01.09.09	0,51	1,00			
02.09.09			0,51	1,00	
06.10.09	0,45	1,00	0,47	1,00	
11.12.09	0,54	1,00	0,52	1,00	
06.01.10	0,55	1,00	0,56	1,00	

En este informe, como una primera aproximación a la estimación del balance de masa, se calculó el cociente entre la diferencia de altura de nieve/hielo de cada baliza y la diferencia promedio de altura de todas las balizas, vale decir un factor de influencia de cada baliza con respecto al promedio de las balizas, tanto para la época de acumulación como la época de ablación. Este factor se utilizó para calcular el balance de masa del glaciar en equivalente en agua (eq.a.) entre épocas sucesivas cuando existía falta de datos por desaparición de algunas balizas, lo cual solía ocurrir con las balizas de colihue, particularmente en invierno debido a la abundante precipitación de nieve y al fuerte viento. Este problema se mejoró sustancialmente con la incorporación de balizas de aluminio. Los resultados que se presentan en la Tabla 3.18.

Tal como se puede observar, desde el 4 de enero de 2009 hasta el 6 de enero de 2010 el balance de masa acumulado anual para el glaciar Mocho es de -137 cm eq.a., vale decir el glaciar perdió 1,37 m eq.a. en promedio.

También existe desde Mayo 2006 una estación meteorológica ubicada en roca a una cota de 2014 m cerca del borde norte del glaciar del volcán Mocho (baliza 18), fuera de la cuenca del denominado glaciar Mocho, donde se mide radiación incidente de onda corta y onda larga, temperatura, velocidad y dirección de viento (Escobar, 2008). El anemómetro se rompió el año 2008 y aun no ha sido repuesto.

Tabla 3.18. Balance de masa del glaciar Mocho correspondiente al año 2009.

Fechas	Balance de masa del período	Balance de masa acumulado
DD.MM.AA	cm eq.a.	cm eq..a.
04.01.09-08.02-09	-138	-138
08.02.09-09.03.09	-148	-286
09.03.09-11.04.09	-93	-379
11.04.09-26.04.09	-34	-413
26.04.09-29.05.09	-23	-436
29.05.09-24.07.09	157	-279
24.07.09-02.09.09	100	-178
02.09.09-07.10.09	37	-142
07.10.09-10.11.09	58	-84
10.11.09-11.12.09	-5	-89
11.12.09-06.01.09	-48	-137

3.5.2.3. Instalación de Estación Fluviométrica.

En abril de 2009 se efectuó una exploración y aforo del efluente que drena la porción norte del glaciar Mocho y que tiene una superficie glaciar de 2,09 km² correspondiendo al 41% del área total del glaciar (5,1 km²). En diciembre de 2009 se instaló una estación fluviométrica en dicho efluente (Figura 3.59). La superficie total de la cuenca aguas arriba de la estación hidrológica es de 3,04 km², con una proporción de área englaciada de 68,7% (Figura 3.60 y Figura 3.61). Las áreas se delimitaron a partir del modelo digital de terreno SRTM del año 2000 y datos GPS de terreno.



Figura 3.59. Estación fluviométrica y sección de aforo. Vista hacia abajo. En la figura izquierda se observa el panel solar y la caseta. A la derecha la sección del estero. Las fotos son previas a la instalación del sensor de nivel, cuyo cable se puede observar en el borde derecho de ambas fotos.

Los instrumentos y equipos instalados en el sitio son los siguientes (Figura 3.62 y Figura 3.63):

- Datalogger modelo AXSYS MPU, con memoria interna de 128 Mb.
- Sensor transductor de presión SDI 12, serie 500.
- Batería 12v 24 Ah.
- Panel Solar 10w
- Regla limnimétrica de 1m.
- Caseta metálica.



Figura 3.60. Subcuenca glacial que alimenta el estero donde fue instalado el limnómetro.

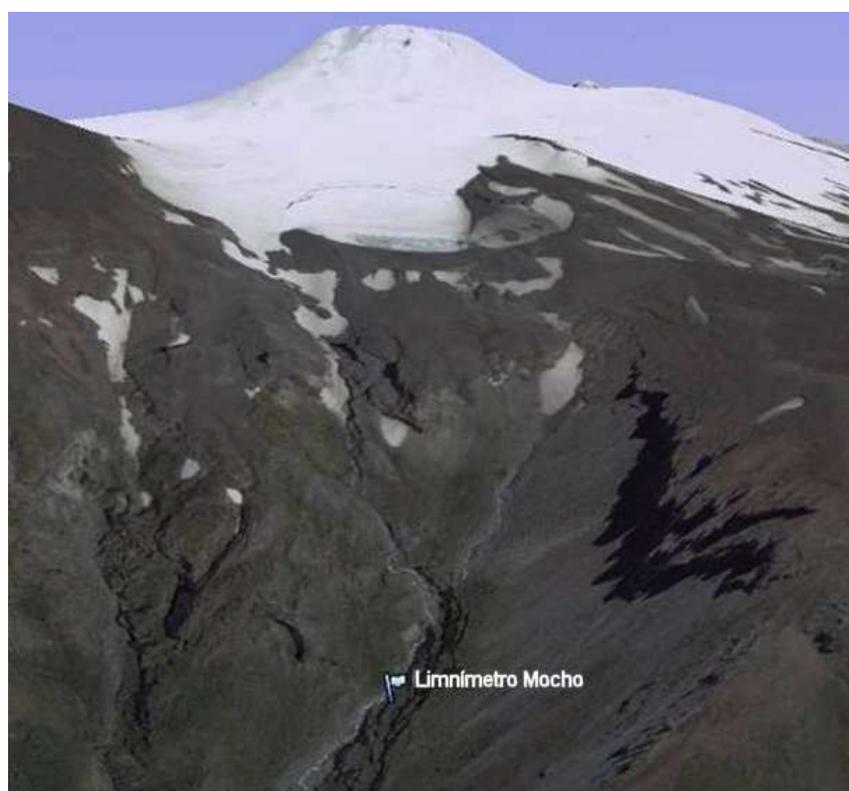


Figura 3.61. Vista 3D con la ubicación de la estación hidrológica.



Figura 3.62. Caseta, datalogger, batería y panel solar.



Figura 3.63. Regla limnimétrica y transductor.

La instalación de la estación fluviométrica se efectuó en el período 9-12 diciembre de 2009 por personal de la empresa David Gálvez, PAEX (Patagonia Adventure Expeditions) y CECS. La empresa de David Gálvez tuvo a cargo la instalación, calibración de los instrumentos y puesta en marcha de la estación. La empresa PAEX se encargó de la logística en terreno (Figura 3.64). La supervisión de la operación estuvo a cargo del CECS, con José Luis Rodríguez en terreno y Gino Casassa en las oficinas en Valdivia.



Figura 3.64. Personal de la empresa PAEX realizando porteo de materiales y equipos durante las faenas de instalación de la estación hidrológica.

Tabla 3. 19. Aforo del efluente norte del glaciar Mocho, 10 de diciembre de 2009, 08:00 h.

CAUDAL TOTAL :0,725 M3/S
 VELOCIDAD MEDIA :0,556 M/S
 PROFUNDIDAD MEDIA :0,434 M
 AREA SECCION :1,303 M2

PERIMETRO MOJADO :3,434 M
 RADIO HIDRAULICO :0,379 M
 FACTOR HIDRAULICO DE MANNING :1,061 $Q/(AR^{2/3})$
 FACTOR HIDRAULICO DE CHEZY :0,903 $Q/(AR^{1/2})$

ANGULO HOR.	ABSCISA M	TRAMO VERTICAL	DE LA VERTICAL	VELOC M/S	ANGULO VERT.	PROFUN. TOTAL M	C A U D A L VERT	M3/S ACUM	TOTAL
0,00	0,100	0,204	18	0,004	0,004	0,5			
0,20	0,350	0,204	18	0,009	0,013	1,8			
0,50	0,650	0,175	25	0,013	0,026	3,6			
0,80	0,950	0,385	50	0,058	0,084	11,6			
1,10	1,250	0,408	60	0,073	0,157	21,7			
1,40	1,550	0,816	70	0,171	0,329	45,3			
1,70	1,850	0,771	60	0,139	0,467	64,5			
2,00	2,150	0,680	50	0,102	0,569	78,6			
2,30	2,450	1,179	20	0,071	0,640	88,3			
2,60	2,750	0,476	50	0,071	0,711	98,2			
2,90	2,950	0,156	40	0,012	0,724	99,9			
3,00	3,000	0,153	10	0,001	0,725	100,0			

Tabla 3. 20. Aforo del efluente norte del glaciar Mocho, 10 de diciembre de 2009, 16:00 h.

CAUDAL TOTAL	:1,386 M3/S								
VELOCIDAD MEDIA	:0,839 M/S								
PROFUNDIDAD MEDIA	:0,459 M								
AREA SECCION	:1,653 M2								
PERIMETRO MOJADO	:4,059 M								
RADIO HIDRAULICO	:0,407 M								
FACTOR HIDRAULICO DE MANNING	:1,527 Q/(AR**(2/3))								
FACTOR HIDRAULICO DE CHEZY	:1,314 Q/(AR**(1/2))								
ANGULO HOR.	ABSCISA M	TRAMO VERTICAL	DE LA VERTICAL	VELOC M/S	ANGULO VERT.	PROFUN. TOTAL M	C A U D A L VERT	M3/S ACUM	TOTAL
0,00		0,250		0,182		10	0,005	0,005	0,3
0,50		0,750		0,175		20	0,018	0,022	1,6
1,00		1,250		0,395		60	0,118	0,141	10,1
1,50		1,750		1,428		70	0,500	0,640	46,2
2,00		2,250		1,315		60	0,394	1,035	74,6
2,50		2,750		0,861		60	0,258	1,293	93,3
3,00		3,200		0,363		40	0,065	1,358	98,0
3,40		3,500		0,283		26	0,022	1,381	99,6
3,60		3,600		0,289		20	0,006	1,386	100,0

Tabla 3. 21. Aforo del efluente norte del glaciar Mocho, 26 de abril de 2009.

CAUDAL TOTAL	:0,062 M3/S								
VELOCIDAD MEDIA	:0,308 M/S								
PROFUNDIDAD MEDIA	:0,144 M								
AREA SECCION	:0,202 M2								
PERIMETRO MOJADO	:1,544 M								
RADIO HIDRAULICO	:0,131 M								
FACTOR HIDRAULICO DE MANNING	:1,196 Q/(AR**(2/3))								
FACTOR HIDRAULICO DE CHEZY	:0,852 Q/(AR**(1/2))								
ANGULO HOR.	ABSCISA M	TRAMO VERTICAL	DE LA VERTICAL	VELOC M/S	ANGULO VERT.	PROFUN. TOTAL M	C A U D A L VERT	M3/S ACUM	TOTAL
0,00		0,100		0,136		5	0,001	0,001	1,1
0,20		0,300		0,140		9	0,003	0,003	5,2
0,40		0,500		0,149		11	0,003	0,006	10,4
0,60		0,750		0,567		11	0,016	0,022	35,6
0,90		0,950		0,580		17	0,020	0,042	67,4
1,00		1,100		0,272		20	0,008	0,050	80,5
1,20		1,300		0,185		30	0,011	0,061	98,5
1,40		1,400		0,185		5	0,001	0,062	100,0

Durante el período de instalación, específicamente el día 10 de diciembre de 2009, la empresa David Gálvez Caprile efectuó dos aforos:

- Primer aforo realizado a las 08:00 horas, total de 0,725 m³/s (Tabla 3. 19).
- Segundo aforo realizado el mismo día a las 16:00 horas, total de 1,386 m³/s (Tabla 3. 20).

Anteriormente, durante la exploración efectuada el 26 de abril de 2009, se efectuó un aforo del mismo efluente, pero en una sección ubicada 50 m aguas arriba, a una altitud 5 m más alta (Tabla 3. 21).