



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

# **CATASTRO, EXPLORACIÓN Y ESTUDIO DE GLACIARES EN CHILE CENTRAL**

**REALIZADO POR:**

**GEOESTUDIOS LTDA.**

**S.I.T. N° 265**

**Santiago, Diciembre del 2011**

## **MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS**

Ministro de Obras Públicas  
Ingeniero Civil Sr. Laurence Golborne R.

Director General de Aguas  
Abogado Sr. Matías Desmadryl L.

Jefe Unidad Glaciología y Nieves  
Dr. Gonzalo Barcaza S.

Inspector Fiscal  
Geóloga Srta. M<sup>a</sup> Belén Varela M.

### GEOESTUDIOS LTDA.

Jefe de Proyecto  
Dr. Cedomir Marangunic D.

#### Profesionales

Geógrafa Srta. Alejandra Pérez L.  
Geomensor Sr. Cristián Peralta A.  
MSc Sra. Pilar González.  
Ingeniera Informático Sra. Ana María Marangunic V.  
Técnico Sr. Andrés Marangunic V.  
Técnico Sr. Andrés Middleton M.  
Técnico Sr. Miguel Ledda V.

## INDICE

	<b>Página</b>
RESUMEN .....	11
1. INTRODUCCION .....	12
2. OBJETIVOS .....	13
2.1. Objetivo general .....	13
2.2. Objetivos específicos .....	13
3. INVENTARIO DE GLACIARES .....	14
3.1. Aspectos Generales .....	14
3.2. ÁREA DE ESTUDIO .....	14
3.2.1. Cuenca del río Aconcagua .....	16
3.2.2. Cuenca del río Maipo .....	16
3.2.3. Cuenca del río Rapel .....	17
3.2.4. Cuenca del río Mataquito .....	18
3.2.5. Cuenca del río Maule .....	19
3.3. LIMITACIONES .....	19
3.4. MARCO CONCEPTUAL .....	21
3.4.1. Definición de glaciar .....	21
3.4.2. Tipología de glaciares consideradas en el inventario .....	26
3.5. METODOLOGÍA .....	30
3.5.1. Recopilación .....	30
3.5.2. Adquisición de materiales y procesamiento de información .....	30
3.5.3. Identificación de glaciares .....	32
3.5.3.1. Formato de los datos .....	32
3.5.3.2. Identificación de glaciares descubiertos .....	33
3.5.3.3. Identificación de glaciares rocosos .....	40
3.5.4. Inventario de glaciares .....	42
3.5.4.1. Variables incluidas en las tablas de atributos del inventario de glaciares .....	42
3.6. RESULTADOS .....	49
3.6.1. Aspectos Generales .....	49
3.6.2. Cuenca del río Aconcagua .....	50
3.6.3. Cuenca del río Maipo .....	52
3.6.3.1. Aspectos generales .....	52
3.6.4. Cuenca del río Rapel .....	54
3.6.4.1. Aspectos generales .....	54
3.6.5. Cuenca del río Mataquito .....	56
3.6.5.1. Aspectos generales .....	56
3.6.6. Cuenca del río Maule .....	58
3.6.6.1. Aspectos generales .....	58
4. MONITOREO DEL GLACIAR UNIVERSIDAD Y PROPUESTA DE RED GLACIOLÓGICA .....	60
4.1. ASPECTOS GENERALES .....	60
4.2. UBICACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL GLACIAR UNIVERSIDAD .....	61
4.3. ASPECTOS GENERALES del glaciar .....	64
4.3.1. Preparación de las campañas a terreno .....	64
4.3.2. Las campañas al glaciar Universidad .....	66
4.3.2.1. La primera campaña de terreno .....	66

4.3.3.	Las campañas siguientes.....	67
4.4.	EL BALANCE DE MASAS DEL GLACIAR .....	70
4.4.1.	Instalación y control de la red de balizas de ablación .....	70
4.4.1.1.	La red de balizas.....	70
4.4.1.2.	Los materiales de las balizas y colocación de estas.....	73
4.4.1.3.	La instalación y el sistema de medición.....	76
4.4.1.4.	Resultados en los controles de ablación .....	82
4.4.2.	Determinaciones de densidad de la neviza .....	85
4.4.2.1.	Puntos de medición y procedimiento.....	85
4.4.2.2.	Resultados de las observaciones de densidad .....	86
4.4.3.	El balance de masa Diciembre 2010 y Marzo de 2011 .....	91
4.4.4.	Estimación del balance de masa anual .....	95
4.4.4.1.	Aspectos generales .....	95
4.4.4.2.	Estimaciones de temperatura de inicio y término de la temporada de ablación.....	97
4.4.4.3.	Estimaciones de densidad por área.....	98
4.4.4.4.	Estimación de espesor de la neviza remanente de la última temporada invernal .....	98
4.4.4.5.	Resultados .....	99
4.4.5.	Levantamiento geodésico de puntos en perfiles sobre el glaciar .....	105
4.4.5.1.	Elección de rutas del levantamiento.....	105
4.4.5.2.	Equipos utilizados en el levantamiento.....	106
4.4.5.3.	Mediciones .....	107
4.4.5.4.	Los resultados del levantamiento geodésico .....	108
4.5.	OBSERVACIONES HIDROLÓGICAS DEL GLACIAR UNIVERSIDAD.....	114
4.5.1.	La estación fluviométrica.....	114
4.5.2.	Aforos en el cauce del río .....	116
4.5.3.	Estimación del balance hídrico .....	118
4.5.3.1.	La precipitación .....	118
4.5.3.2.	La evaporación .....	118
4.5.3.3.	Escorrentía.....	119
4.5.3.4.	Congelamiento de agua a hielo .....	120
4.5.3.5.	El cambio en el total de la masa de agua – balance hídrico.....	120
4.6.	EL BALANCE DE ENERGÍA SUPERFICIAL DEL GLACIAR .....	120
4.6.1.	La estación meteorológica automática .....	120
4.6.1.1.	Instalación de la estación meteorológica .....	120
4.6.1.2.	Otros aspectos de la estación meteorológica automática .....	126
4.6.2.	Los registros en la Estación Meteorológica Automática en el glaciar .....	127
4.6.2.1.	Aspectos generales de los registros meteorológicos observados ....	127
4.6.2.2.	Parámetros meteorológicos registrados.....	128
4.6.2.2.1.	Temperatura .....	128
4.6.2.2.2.	Precipitación.....	132
4.6.2.2.3.	Viento.....	133
4.6.2.2.4.	Humedad relativa.....	133
4.6.2.2.5.	Presión atmosférica .....	134
4.6.2.2.6.	Radiación onda corta, incidente y reflejada.....	134
4.6.2.2.7.	Radiación onda larga, incidente y emitida.....	143
4.6.3.	Resultados del balance calórico.....	148
5.	PROPUESTA DE RED GLACIOLÓGICA .....	150
5.1.	ASPECTOS GENERALES.....	150
5.2.	Proposición de nuevo punto para estación de aforo del Glaciar Universidad .....	151
5.3.	LOS GLACIARES PROPUESTOS POR CUENCA .....	153

5.4.	EL GLACIAR EN LA CUENCA DEL RÍO ACONCAGUA .....	154
5.4.1.	El glaciar ubicado al oeste del glaciar Monos de Agua .....	154
5.4.2.	La estación de aforo .....	155
5.5.	EL GLACIAR EN LA CUENCA DEL RÍO MAIPO .....	160
5.5.1.	El glaciar Olivares Alfa .....	160
5.5.2.	Estación de aforo .....	161
5.6.	EL GLACIAR EN LA CUENCA DEL RÍO RAPEL .....	164
5.6.1.	Glaciar al oeste del glaciar Cipreses.....	164
5.6.2.	Estación de Aforo .....	165
5.7.	EL GLACIAR EN LA CUENCA DEL RÍO MAULE.....	168
5.7.1.	El glaciar Pellado.....	168
5.7.2.	Estación de aforo .....	169
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	173
7.	BIBLIOGRAFÍA .....	175

## Índice de Tablas

Tabla 3.5.2-A. Principales aplicaciones glaciológicas con sensores remotos. ....	30
Tabla 3.5.2-B. Materiales adquiridos para el inventario de glaciares. ....	31
Tabla 3.5.2-C. Software utilizados en el inventariar los glaciares. ....	31
Tabla 3.5.2-D. Detalle de ASTER DEM utilizados en el área de estudio utilizadas en el inventario de glaciares. ....	32
Tabla 3.5.3.1-A. Rasgos distintivos de un glaciar rocoso en una imagen satelital o fotografía aérea.....	33
Tabla 3.5.3.2-A. Detalles técnicos de la imagen Landsat ETM+.....	37
Tabla 3.5.3.2-B. Detalles imágenes Landsat ETM+ utilizadas en el inventario de glaciares. ....	38
Tabla 3.5.3.3-A. Descripción de las imágenes disponibles para la identificación de glaciares rocosos. ....	40
Tabla 3.5.4.1-A. Detalle del código de glaciar definido por la WGI.....	43
Tabla 3.5.4.1-B. Detalle del código de glaciar definido por la WGI.....	44
Tabla 3.5.4.1-C. Detalle de atributos del inventario de glaciares. ....	48
Tabla 3.6.2-A. Inventario de glaciares de la cuenca del río Aconcagua.....	51
Tabla 3.6.3.1-A. Inventario de glaciares de la cuenca del río Maipo.....	53
Tabla 3.6.4.1-A. Síntesis de atributos del inventario de glaciares de la Cuenca del río Rapel. ....	55
Tabla 3.6.5.1-A. Inventario de glaciares de la cuenca del río Mataquito. ....	57
Tabla 3.6.6.1-A. Inventario de glaciares de la cuenca del río Maule.....	59
Tabla. 4.2-A. Ficha descriptiva del glaciar Universidad, los datos corresponden al inventario de glaciares. ....	63
Tabla 4.4.1.1-A. Fecha de instalación y coordenadas UTM de balizas.....	73
Tabla 4.4.1.4-A. Relación entre T° y Ablación, por periodo y sector.....	83
Tabla 4.4.1.4-B. Resumen de los resultados de la ablación entre los controles. ....	84
Tabla 4.4.2.2-A. Resultados de las mediciones de densidad en pozo en la cuenca Norte del glaciar Universidad, en la 1° campaña a terreno.....	87
Tabla 4.4.2.2-B. Resultados de las mediciones de densidad en pozo en la cuenca Norte del glaciar Universidad, en la 2° campaña a terreno.....	87
Tabla 4.4.2.2-C. Resultados de las mediciones de densidad en pozo en la cuenca Norte del glaciar Universidad correspondiente a la 3° campaña a terreno. ....	87
Tabla 4.4.2.2-D. Resultados de las mediciones de densidad en pozo en la cuenca Oeste del glaciar Universidad, en la 1° campaña a terreno.....	88

Tabla 4.4.2.2-E. Resultados de las mediciones de densidad en pozo en la cuenca Oeste del glaciar Universidad, en la 2° campaña a terreno.....	88
Tabla 4.4.2.2-F. Resultados de las mediciones de densidad en pozo en la cuenca Oeste del glaciar Universidad, en la 3° campaña a terreno.....	88
Tabla 4.4.3-A. Masa total perdida en la superficie del glaciar Universidad, Diciembre de 2010 y Marzo de 2011. ....	94
Tabla 4.4.4.5-A. Pérdida de masa en el glaciar Universidad, con respecto a la superficie de fin del verano 2010. ....	101
Tabla 4.4.4.5-B. Pérdida de masa en el glaciar Universidad, respecto a la superficie de fin del verano 2010, en el intervalo de tiempo desde las fechas estimadas de inicio de la temporada veraniega de ablación 2010-2011. ....	102
Tabla 4.4.4.5-C. Pérdida de masa en el glaciar Universidad, con respecto a la superficie de fin del verano 2010, en el intervalo de tiempo desde las diferentes fechas estimadas de inicio de la temporada veraniega de ablación 2010-2011.....	103
Tabla 4.4.4.5-D. Pérdida de masa en el glaciar Universidad, con respecto a la superficie de fin del verano 2010. ....	104
Tabla 4.5.2-A. Resultados de las observaciones de nivel de agua en la regleta inclinada de los restos de la estación de aforo en el río que descarga la laguna pro glacial del frente del glaciar Universidad. ....	118
Tabla 4.6.1.1-A. Distribución de sensores en la estación meteorológica automática en el glaciar Universidad.. ....	125
Tabla 4.6.2.2.1-A. Promedio de horas diarias de sol en el glaciar Universidad. ....	128
Tabla 4.6.2.2.1-B. Pendiente ( $\tan \alpha$ ) promedio de la línea temperatura vs. log altura de sensores, y constante (kT) del perfil de temperatura.....	129
Tabla 4.6.2.2.3-A. Pendiente ( $\tan \alpha$ ) promedio de la línea velocidad de viento vs. Log altura de sensores, en una estación meteorológica en el glaciar Universidad. ....	133
Tabla 4.6.2.2.4-A. Humedad relativa (%) observada en el glaciar Universidad a cota de 2.860 m.s.n.m. ....	133
Tabla 4.6.2.2.6-A. Registro horario de radiación onda corta de la estación meteorológica en el glaciar Universidad.....	137
Tabla 4.6.2.2.6-B. Registro horario de radiación onda corta de la estación meteorológica en San Andrés.....	141
Tabla 4.6.2.2.7-A. Registro de radiación onda larga de la estación meteorológica en el glaciar Universidad. ....	143
Tabla 5.3-A. Ubicación geográfica de un punto central de los glaciares propuestos.....	154

## Índice de Figuras

Figura 3.2-A. Área de estudio inventario de glaciares .....	15
Figura 3.4.1-A. Esquema de sinterización del manto de nieve y deformación y reptación del manto de nieve o glaciar. ....	23
Figura 3.4.1-B. Perfil vertical por el eje de un glaciar, mostrando la disposición de las zonas de acumulación y de ablación.....	24
Figura 3.4.1-C. Esquema en planta del campo teórico de esfuerzos en un glaciar y la disposición de los sistemas de fracturas en la masa de hielo. ....	24
Figura 3.4.1-D. Esquema de disposición teórica de fracturas en un perfil vertical por el eje de un glaciar.....	25
Figura 3.4.2-A. Ejemplo de Glaciar Descubierto "Juncal Sur". .	26
Figura 3.4.2-B. Glaciar al oeste de glaciar Marmolejo. ....	27
Figura 3.4.2-C. El glaciar de roca Pedregoso, Chile. ....	28
Figura 3.4.2-D. Zanja en un glaciar de roca, glaciar Monolito en la cordillera de la zona central de Chile. ....	29
Figura 3.4.2-E. Depósitos de lóbulos y rampa Protalus al pie de laderas cubiertas de talus. ....	29
Figura 3.5.3.1-A. Formato de inventario de glaciares de un glaciar rocoso y la columna correspondiente a los datos del polígono. ....	33
Figura 3.5.3.2-A. Comportamientos espectrales del agua, vegetación arena y nieve. ....	34
Figura 3.5.3.2-B. Comportamiento espectral de nieve fresca, hielo refundido y glaciar. .	35
Figura 3.5.3.2-C. Métodos Falso Color 742, NDSI y Band Ratio 3/5 respectivamente utilizando una imagen Landsat. ....	36
Figura 3.5.3.2-D. Imagen Landsat posterior al año 2003 con errores. ....	38
Figura 3.5.3.2-E. Aumento de la resolución espacial de una imagen Landsat ETM+ utilizando la banda pancromática de 15 m. ....	39
Figura 3.6.1-A. Ejemplo de glaciares descubiertos (delineados en rojo) y rocosos (delineados en azul) identificados en la cuenca del río Maipo.....	49
Figura 4.2-A. Ubicación del glaciar Universidad en la sub-cuenca del Río Cachapoal. ....	62
Figura 4.3.3-A. Plano de ubicación de campamentos, balizas de ablación, estación meteorológica, pozos de densidades y rutas de tránsito sobre el glaciar. ....	69
Figura 4.4.1.1-A. Distribución de balizas para el control de la ablación en el glaciar Universidad. ....	71
Figura 4.4.1.1-B. Ubicación de balizas para el control de la ablación en el glaciar Universidad. ....	72

Figura 4.4.1.2-A. Taladro de perforación en hielo y baliza flexible de PVC. ....	74
Figura 4.4.1.2-B. Insertando una baliza en el sondaje previamente realizado. ....	74
Figura 4.4.1.2-C. Apariencia de una baliza flexible de PVC, instalada en el hielo. ....	75
Figura 4.4.1.2-D. Baliza flexible de PVC, con marcas de identificación y nivel de la superficie del hielo. ....	75
Figura 4.4.1.3-A. Baliza de PVC de 5 m de largo, después de un periodo de tiempo, lapso en el cual ha disminuido en 1 m el espesor de hielo o nieve, por lo que el tramo de PVC sobresaliente de la superficie ha aumentado a 2 m. ....	77
Figura 4.4.1.3-B. Trabajos de perforación del hielo con taladro mecánico en la cuenca Norte del glaciar Universidad. ....	78
Figura 4.4.1.3-C. Baliza de ablación instalada en la cuenca Norte del glaciar Universidad. ....	78
Figura 4.4.1.3-D. Ascenso hacia la zona alta de la cuenca Oeste del glaciar Universidad. ....	79
Figura 4.4.1.3-E. Baliza de ablación instalada en la zona alta de la cuenca Oeste del glaciar Universidad. ....	79
Figura 4.4.1.3-F. Reinstalación de una baliza de ablación en la zona baja del glaciar Universidad. ....	80
Figura 4.4.1.3-G. Ascenso hacia la zona de acumulación de la cuenca Oeste del glaciar Universidad. ....	81
Figura 4.4.1.3-H. Baliza de ablación encontrada dentro de una grieta en la zona de acumulación de la cuenca Oeste del glaciar Universidad. ....	81
Figura 4.4.1.3-I. Perforación manual con taladro para la reinstalación de baliza en cuenca Oeste del glaciar Universidad. ....	82
Figura 4.4.1.3-J. Desplazamiento a través de un campo de grietas durante la tercera campaña. ....	82
Figura 4.4.2.1-A. Ubicación de los pozos para mediciones de densidad de nieve en el glaciar Universidad, en el verano 2010-2011. ....	85
Figura 4.4.2.1-B. Tubos muestreadores, balanza y otros elementos del equipo para medir densidad de nieve en las paredes de un pozo. ....	86
Figura 4.4.2.2-A. Variación de la densidad de la neviza con la profundidad en los pozos en las cuencas Norte y Oeste del glaciar Universidad, durante la 1° campaña. ....	89
Figura 4.4.2.2-B. Variación de la densidad de la neviza con la profundidad en los pozos en las cuencas Norte y Oeste del glaciar Universidad, durante la 2° campaña. ....	90
Figura 4.4.2.2-C. Variación de la densidad de la neviza con la profundidad en los pozos en las cuencas Norte y Oeste del glaciar Universidad, durante la 3a campaña. ....	91
Figura 4.4.3-A. Sectores en que se ha dividido el glaciar Universidad, considerados	

homogéneos en cuanto a densidades de la neviza y montos de ablación en los intervalos de tiempo analizados, para efectos de estimación del balance de masas. ....	92
Figura 4.4.4.1-A. Comparación de temperaturas entre estación San Andrés y estación en el glaciar durante el periodo que se obtuvieron datos en forma paralela. ....	96
Figura 4.4.4.2-A. Comparación de temperaturas entre estación San Andrés y estación en el glaciar durante el periodo que se obtuvieron datos en forma paralela. ....	97
Figura 4.4.5.1-A. Rutas longitudinales y transversales en el glaciar Universidad donde se realizó el levantamiento geodésico. ....	106
Figura 4.4.5.2-A. Toma de datos en la unidad PDA. ....	107
Figura 4.4.5.3-A. Ascensión en la cuenca Norte del glaciar Universidad. ....	107
Figura 4.4.5.3-B. Grieta junto a la ruta del eje longitudinal en la cuenca Oeste del glaciar Universidad. ....	108
Figura 4.4.5.4-A. Ubicación de los perfiles geodésicos realizados en el glaciar Universidad; en azul perfiles longitudinales y en verde los perfiles transversales. ....	109
Figura 4.4.5.4-B. Perfil longitudinal por el eje Norte-Sur del glaciar.. ....	110
Figura 4.4.5.4-C. Perfil longitudinal por el eje de la cuenca Oeste del glaciar Universidad. Ver posición del eje en Figura 4.4.5.4-A.. ....	111
Figura 4.4.5.4-D. Perfil transversal A-A' ( <b>ver ubicación en Figura 4.4.5.4-A</b> ) en la cuenca Norte, Zona de Acumulación, del glaciar Universidad.....	112
Figura 4.4.5.4-E. Perfil transversal B-B' ( <b>ver ubicación en Figura 4.4.5.4-A</b> ), en el área de descarga de la cuenca Norte del glaciar Universidad, algo por debajo de la Línea e Equilibrio del glaciar en el sector. ....	112
Figura 4.4.5.4-F. Perfil transversal C-C', <b>ubicado en la cuenca Oeste del glaciar Universidad</b> (Figura 4.4.5.4-A), Zona de Acumulación. ....	113
Figura 4.4.5.4-G. Perfil transversal D-D', <b>por la cabeza de la cuenca Oeste del glaciar</b> (ver ubicación en Figura 4.4.5.4-A), Zona de acumulación.....	113
Figura 4.4.5.4-H. Perfil transversal E-E', <b>ubicado en la lengua terminal del glaciar Universidad</b> , Zona de Ablación (ver ubicación en Figura 4.4.5.4-A).. ....	114
Figura 4.5.1.1-A. Ubicación de la estación de aforo en relación al glaciar Universidad..	115
Figura 4.5.1.1-B. Ubicación de la estación de aforo y laguna proglacial en el frente del glaciar Universidad .....	115
Figura 4.5.1.1-C. Condición en que se encontró la estación fluviométrica instalada el 17 de Noviembre de 2010. ....	116
Figura 4.5.2-A. Molinete tipo Gurley, utilizado en el aforo del caudal que descarga de la laguna proglacial del glaciar Universidad. ....	116
Figura 4.5.2-B. Planilla de resultados de aforo con molinete en el río que descarga la	

laguna proglacial del frente del glaciar Universidad. ....	117
Figura 4.5.3.2-A. Evaporación medida en Febrero en un campo de penitentes en un glaciar de la cordillera del centro de Chile a la cota de 4.200 m. ....	119
Figura 4.6.1.1-A. Ubicación del lugar donde se instaló la estación meteorológica en el glaciar Universidad, vista en una imagen Google Earth. ....	121
Figura 4.6.1.1-B. Ubicación de los componentes de la estación meteorológica automática, en el mástil de instalación. ....	122
Figura 4.6.1.1-C. La estación meteorológica automática instalada el día 10-12-2010. Primera fecha de instalación. ....	125
Figura 4.6.1.1-D. Vista de una fracción de la planilla de datos obtenida de la Estación Meteorológica Automática instalada en el glaciar Universidad, en formato CSV. ....	126
Figura 4.6.2.2.1-A. Pendiente promedio de la línea de temperatura vs. Log altura de sensores, y constante del perfil de temperatura, para la estación meteorológica en el glaciar Universidad. ....	129
Figura 4.6.2.2.1-B. Temperatura registrada en la estación meteorológica, el día 22 de Febrero en el glaciar Universidad. ....	130
Figura 4.6.2.2.1-C. Temperatura registrada en la estación meteorológica, el día 27 de Febrero en el glaciar Universidad. ....	130
Figura 4.6.2.2.1-D. Temperatura registrada en la estación meteorológica, el día 10 de Marzo en el glaciar Universidad. ....	131
Figura 4.6.2.2.1-E. Temperatura registrada en la estación meteorológica, el día 19 de Marzo en el glaciar Universidad. ....	131
Figura 4.6.2.2.1-F. Temperatura registrada en la estación meteorológica, el día 29 de Marzo en el glaciar Universidad. ....	132
Figura 4.6.2.2.1-G. Temperatura registrada en la estación meteorológica, el día 14 de Abril en el glaciar Universidad. ....	132
Figura 4.6.2.2.6-A. Ejemplos de datos erróneos de radiación solar incidente, en fecha 27 de Febrero, en un periodo de 24 horas. ....	135
Figura 4.6.2.2.6-B. Ejemplos de datos erróneos de radiación solar incidente, en fecha 10 de Marzo, en un periodo de 24 horas. ....	135
Figura 4.6.2.2.6-C. Ejemplos de datos erróneos de radiación solar incidente, en fecha 29 de Marzo, en un periodo de 24 horas. ....	136
Figura 4.6.2.2.6-D. Ejemplos de datos erróneos de radiación solar incidente, en fecha 7 de Abril, en un periodo de 24 horas. ....	136
Figura 5.2-A. Ubicación propuesta para el nuevo emplazamiento de la estación de aforo cercana al glaciar Universidad. ....	152

Figura 5.2-B. Detalle de la ubicación propuesta para el nuevo emplazamiento de la estación de aforo cercana al glaciar Universidad. ....	152
Figura 5.4.1-A. Detalle glaciar al Oeste del glaciar Monos de Agua. ....	154
Figura 5.4.2-A. Trayecto hacia el glaciar desde el sector de Hornitos. ....	156
Figura 5.4.2-B. Ubicación del glaciar propuesto y del punto de aforo propuesto en la quebrada de Monos de Agua. ....	156
Figura 5.4.2-C. Ubicación del punto de aforo propuesto en la quebrada Monos de agua. ....	157
Figura 5.4.2-D. Ubicación de la estación de aforo propuesta, en desembocadura de la quebrada que desagua el glaciar al Oeste del glaciar Monos de Agua. ....	158
Figura 5.4.2-E. Ubicación de la estación de aforro, en la descarga del cañadón que baja desde el glaciar Monos de Agua. ....	159
Figura 5.4.2-F. Ubicación de la estación de aforro, en la descarga del cañadón que baja desde el glaciar al Oeste del glaciar Monos de Agua. ....	160
Figura 5.5.1-A. Glaciar Olivares Alfa Sur, fotografiado desde el Norte en un vuelo en el sector. ....	161
Figura 5.5.2-A. Vista del glaciar, y el lugar propuesto para construir la estación de aforo en el cauce que reúne las aguas que emergen del glaciar Olivares Alfa. ....	163
Figura 5.5.2-B. Vista del punto de aforo en el estero del Olivares, desde unos 70 m aguas arriba del punto. ....	163
Figura 5.5.2-C. Vista hacia el frente del glaciar Olivares Alfa, desde el punto de aforo propuesto. ....	164
Figura 5.6.1-A Glaciar propuesto para monitoreo, ubicado al interior de la quebrada Los Arrieros, en la cuenca de alta montaña del río Rapel. ....	165
Figura 5.6.2-A. Glaciar propuesto para la cuenca del Río Rapel, y ubicación del punto propuesto para instalar la estación de aforo, en imagen Google Earth. ....	166
Figura 5.6.2-B. Ubicación muro estación de aforo. ....	167
Figura 5.6.2-C. Paso estrecho en el acceso al sector alto de la quebrada Los Arrieros. ....	167
Figura 5.7.1-A. El glaciar propuesto para monitoreo en la cuenca del Río Maule, ubicado en la falda Sur-sur este del Volcán Pellado. ....	169
Figura 5.7.2-A. Vista aérea del glaciar en el Volcán Pellado y de la ubicación del punto de aforo aguas abajo del glaciar. ....	171
Figura 5.7.2-B. Ubicación del lugar propuesto para la construcción del aforo, aguas abajo del lugar donde confluyen los cauces provenientes del glaciar. ....	171
Figura 5.7.2-C. La estación de aforos se ubicaría en el frente de un remanso en el cauce, al centro-derecha de la foto. ....	172

## RESUMEN

El presente estudio es parte del objetivo general de la Unidad de Glaciología y Nieves, UNG, de la Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas, en cuanto a mejorar el conocimiento de la criósfera en Chile. Comprende el:

- Realizar la actualización del inventario de glaciares descubiertos en las cuencas de los ríos Maipo, Rapel, Maule y Mataquito.
- Realizar el inventario de glaciares rocosos de la cuenca hidrológica del río Aconcagua, en la VI Región.
- Proponer una red glaciológica para el monitoreo en las cuencas mencionadas, permitiendo obtener una continuidad temporal en los glaciares en los Andes Centrales.
- Realizar estudios glaciológicos e hídricos en el glaciar Universidad continuando con estudios de monitoreo anteriores.

El inventario de glaciares fue realizado según las recomendaciones de UNESCO para identificación de glaciares. Los glaciares descubiertos se han identificado utilizando imágenes Landsat ETM+ con 15 metros de resolución espacial. Los glaciares rocosos se han identificado mediante imágenes Spot extraídas del software Google Earth y el apoyo de fotografías aéreas. Se identificaron 565 glaciares descubiertos, 1228 glaciares rocosos y 657 tipos de masas de hielo.

Se ha propuesto para la red glaciológica, los siguientes glaciares:

- El glaciar al Oeste del glaciar Monos de Agua en la cuenca del Río Aconcagua.
- El glaciar Olivares Alfa en la cuenca del Río Maipo.
- Un glaciar sin sombra en la cuenca del Río Rapel.
- El glaciar de la falda Sur-sureste del cerro Pellado (y que en adelante denominamos como glaciar Pellado).

En el glaciar Universidad se realizó una estimación de balance de masa anual y del de energía en un periodo breve.

## 1. INTRODUCCION

La Unidad de Glaciología y Nieves (en adelante UGN), perteneciente a la Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas, ha considerado prioritario mejorar el conocimiento de la criósfera en Chile a través de la actualización de los inventarios de glaciares y el establecimiento de redes glaciológicas que permitan realizar futuros monitoreos. Una de las zonas prioritarias son los Andes de Chile Central. Las cuencas hidrológicas comprendidas en esta zona se encuentran entre la región de Valparaíso y la región del Maule y son las siguientes:

- Cuenca del río Aconcagua
- Cuenca del río Maipo
- Cuenca del río Rapel
- Cuenca del río Mataquito
- Cuenca del río Maule

Es relevante actualizar los inventarios existentes en estas cuencas, ya que éstos han sido elaborados con distintas bases cartográficas, escalas de trabajo y fechas. En algunos estudios se ha omitido la presencia de glaciares rocosos puesto que las propiedades espectrales de estos glaciares son distintas a las propiedades espectrales de la nieve y el hielo.

El monitoreo de glaciares en los Andes Centrales no ha presentado una continuidad temporal, salvo el balance de masa del glaciar Echaurren, ubicado en la cuenca del Río Maipo, el cual ha sido monitoreado desde el año 1975. Se requiere el monitoreo de glaciares de mayores dimensiones para tener una idea general del balance glaciológico e hídrico de los glaciares de la zona central de Chile. Por ello, es prioritario establecer una red glaciológica de monitoreo en esta zona y además continuar el monitoreo que se lleva realizando en el glaciar Universidad, cuenca del Río Rapel, desde el año 2008.

En el presente trabajo se presenta el inventario de glaciares de las cuencas de los ríos Aconcagua, Maipo, Rapel, Maule y Mataquito. También se presentan los estudios y monitoreos realizados en el glaciar Universidad: balance de masa, balance hídrico y balance de energía del glaciar. Se propone además una red glaciológica para el monitoreo de glaciares en las cuencas mencionadas.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GENERAL**

El objetivo general del estudio que aquí se presenta, establecido en la Resolución Exenta de la DGA N° 1493 del 02 de Junio de 2010 respecto a la Acción de Apoyo denominada "Catastro, exploración y estudio de glaciares en Chile Central" dice:

"Actualizar el inventario de glaciares de las cuencas de los Andes de Chile Central y realizar estudios glaciológicos e hídricos en el glaciar Universidad."

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Como objetivos específicos según la RES arriba referida dice:

- Actualizar el inventario de glaciares descubiertos y realizar el inventario de glaciares rocosos de las cuencas ubicadas entre el río Aconcagua y el río Maule.
- Estimar el balance de masa del glaciar Universidad y mantener la estación meteorológica portátil existente en el glaciar.
- Realizar aforos mensuales en la época estival en la estación fluviométrica existentes aguas abajo del glaciar Universidad con el fin de realizar un balance hídrico del mismo. Realizar el balance de energía en la superficie del glaciar Universidad.
- Seleccionar y proponer un glaciar en cada cuenca inventariada para su monitoreo y realizar campañas glaciológicas exploratorias.

### **3. INVENTARIO DE GLACIARES**

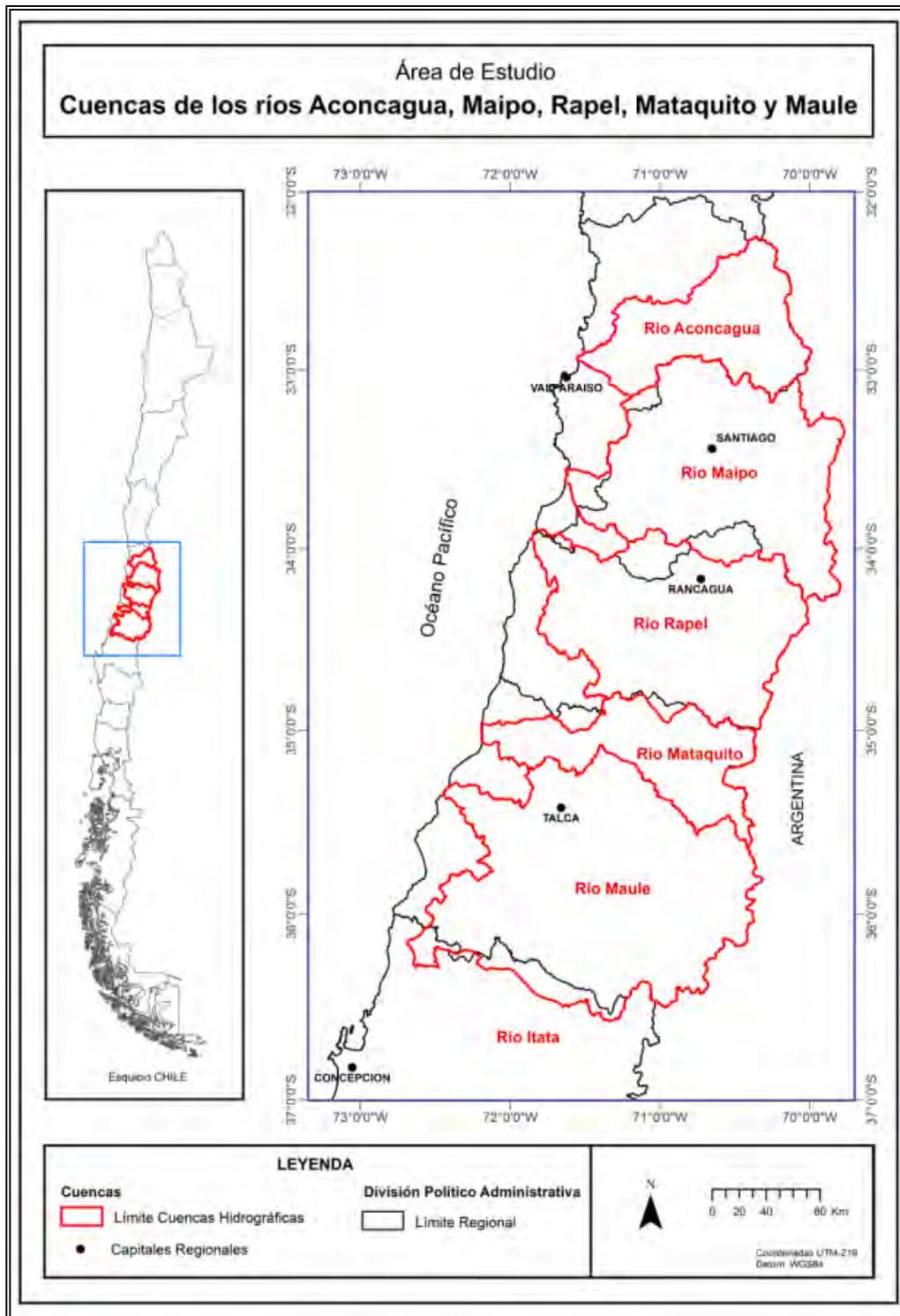
#### **3.1. ASPECTOS GENERALES**

En el presente inventario de glaciares se han identificado los glaciares descubiertos y glaciares rocosos en las cuencas comprendidas entre la región de Valparaíso y la región del Maule. Los glaciares descubiertos se han identificado utilizando imágenes Landsat ETM+ con 15 metros de resolución espacial. Los glaciares rocosos se han identificado mediante imágenes Spot extraídas del software Google Earth y el apoyo de fotografías aéreas.

Para el caso de la cuenca del río Aconcagua, se solicitó sólo realizar el inventario de los glaciares rocosos.

#### **3.2. ÁREA DE ESTUDIO**

El estudio contempla las cuencas ubicadas entre la Región de Valparaíso y la Región del Maule: cuenca del río Aconcagua, cuenca del río Maipo, cuenca del río Rapel, cuenca del río Mataquito y cuenca del río Maule (Figura 3.2-A).



**Figura 3.2-A. Área de estudio inventario de glaciares**

### **3.2.1. Cuenca del río Aconcagua**

La cuenca del río Aconcagua se encuentra en el extremo sur de la zona de los Valles Transversales o Semiárida de la Región de Valparaíso (Figura 3.2-A). Abarca una superficie aproximada de 7.334 km<sup>2</sup>. El río Aconcagua se genera de la confluencia de los ríos Juncal y Blanco y recibe el nombre de Aconcagua a partir de la junta con el río Blanco. Sus afluentes más caudalosos se encuentran en la ribera norte y sus tributarios se encuentran en las cabeceras del interior de la cordillera en cerros como el Juncal (6.110 msnm), Alto de Los Leones o Cabeza de León (5.400 m.s.n.m.) y el Macizo del Aconcagua (7.021 m.s.n.m.).

Los climas que se distinguen en la cuenca del río Aconcagua corresponden al Templado Mediterráneo con Estación Seca Prolongada y Frío de altura en la Cordillera de los Andes. El viento predominante posee dirección SW.

La cuenca del río Aconcagua se divide en 23 sub-subcuencas. Las sub-subcuencas donde se han inventariado glaciares son las siguientes:

- Río Juncal antes junta Estero Juncalillo
- Río Juncal Antes Junta Estero Juncalillo y Junta Rio Blanco
- Río Blanco
- Río Aconcagua entre río Blanco y río Colorado
- Río Colorado antes junta estero Riecillos
- Estero Riecillos
- Río Colorado entre estero Riecillos y río Aconcagua
- Estero Quilpué

Respecto a los estudios más recientes de inventarios realizados en esta cuenca se encuentra el realizado por Valdivia (1984) en el cual se catastraron 267 glaciares. Otro estudio corresponde al de Bown et al (2008) en el cual se estudió la variación de 159 glaciares descubiertos. De acuerdo a la información entregada por la DGA, existe un inventario realizado el 2008 que debido a la resolución de las imágenes utilizadas, consideró sólo parcialmente los glaciares rocosos.

### **3.2.2. Cuenca del río Maipo**

Esta cuenca se encuentra ubicada en parte de la Región de Valparaíso, Región Metropolitana y parte de la Región del Libertador Bernardo O´Higgins (Figura 3.2-A). Su superficie abarca aproximadamente 15.273 km<sup>2</sup>.

Esta cuenca se divide en 37 sub-subcuencas. Las sub-subcuencas en las cuales se han inventariado glaciares se nombran a continuación:

- Río Maipo bajo junta río Negro
- Río Maipo entre río Negro y río Volcán
- Río Volcán
- Río Yeso
- Río Maipo entre río Volcán y río Colorado
- Río Colorado antes junta río Olivares
- Río Olivares
- Río Colorado entre río Olivares y río Maipo
- Estero Angostura antes junta estero Paine
- Río Molina
- Río San Francisco
- Río Mapocho entre río San Francisco y bajo junta estero Arrayán
- Estero Colina

Existen cuatro tributarios importantes en la cuenca alta del río Maipo: río Volcán, río Colorado, río Yeso y río Olivares.

Cabe destacar que en la cuenca del río Maipo el único inventario de glaciares existente a la fecha corresponde al realizado por Marangunic (1979). Parte de la ejecución de este catastro ha analizado el estudio de la hoya del río Maipo, ríos Mapocho y río Colorado, donde se identificaron 647 glaciares, de los cuales el 39% corresponde a glaciares rocosos.

En esta cuenca, la gran mayoría de los glaciares muestran superficies orientadas hacia el sur, de acuerdo al inventario de Marangunic (1979) alrededor del 4% de los glaciares están orientados hacia el norte.

### **3.2.3. Cuenca del río Rapel**

Esta cuenca cubre una pequeña parte de la Región Metropolitana (sur), prácticamente la totalidad de la Región del Libertador Bernardo O'Higgins y una pequeña franja de la Región del Maule (Figura 3.2-A). Su superficie abarca aproximadamente 13.765 km<sup>2</sup>.

Los principales afluentes de esta cuenca son los ríos Cachapoal y Tinguiririca.

Esta cuenca se divide en 51 sub-subcuencas. En las siguientes sub-subcuencas se han inventariado glaciares:

- Río Cachapoal antes junta río Cortaderal
- Río Cortaderal en desembocadura Laguna Pejerreyes
- Río Cortaderal entre Laguna Pejerreyes y río Cachapoal
- Río Cachapoal entre río Cortaderal y río Pangal
- Río Pangal (Río Paredones) en junta con río Blanco
- Río Blanco
- Estero Coya
- Río Cachapoal entre río Pangal y río Claro
- Río Claro
- Río Claro hasta estero Tipaume
- Río Tinguiririca hasta bajo junta río Las Damas
- Río Tinguiririca entre río Las Damas y río del Azufre
- Río Azufre hasta río Portillo
- Río Azufre entre río Portillo y río Tinguiririca
- Río Tinguiririca entre río Azufre y río Clarillo
- Río Clarillo
- Río Claro

En la cuenca del río Rapel se han realizado dos inventarios Caviedes (1979) y Valdivia (1984). El primer inventario realizado en 1979 abarca la cuenca del río Cachapoal y se inventariaron 146 glaciares con un área de 222,2 km<sup>2</sup>. El segundo inventario se realizó en la cuenca del río Tinguiririca y se catastraron 261 glaciares con una superficie total de 106,46 km<sup>2</sup>.

#### **3.2.4. Cuenca del río Mataquito**

La cuenca del río Mataquito se encuentra ubicada en la Región del Maule (Figura 3.2-A). Su superficie abarca aproximadamente 6.335 km<sup>2</sup>. El río Mataquito se origina de la confluencia del río Teno y el río Lontué. El río Teno es el principal afluente de la cuenca.

Esta cuenca se divide en 23 sub-subcuenca. Las sub-subcuencas donde se han identificado glaciares son las siguientes:

- Río Teno bajo junta río del Pellejo
- Río Teno entre río del Pellejo y bajo junta río del Infiernillo
- Río Claro
- Río Colorado bajo junta Valle Grande
- Río Colorado entre Valle Grande y bajo estero Las Mula
- Estero Volcán

El último inventario de glaciares en esta cuenca fue realizado por Noveroy (1987). Se identificaron 81 glaciares descubiertos. No existe información actualizada sobre la superficie de glaciares rocosos existentes en la cuenca.

### **3.2.5. Cuenca del río Maule**

Se encuentra ubicada en la Región del Maule (Figura 3.2-A) y abarca una pequeña franja de la Región del Bío Bío. Su superficie abarca aproximadamente 21.054 km<sup>2</sup>.

Esta cuenca se divide en 64 sub-subcuencas. En las siguientes sub-subcuencas se han identificado glaciares, son las siguientes:

- Río Maule entre desagüe Laguna del Maule y río Puelche
- Río Puelche
- Río Barroso
- Río de La Invernada
- Laguna Invernada y río Cipreses hasta junta río Maule
- Río Maule entre río Cipreses y río Curillinque
- Estero Perales y cajón Troncosa
- Río Guaiquivilo entre estero Relbún y río de La Puente
- Río de La Puente
- Río Melado entre río de La Puente y bajo junta estero El Toro
- Río Claro
- Río Longaví bajo junta río Bullileo
- Río Achibueno bajo junta estero de Pejerreyes
- Río Ancoa

En un trabajo no publicado y a modo de comunicación personal de la Dirección General de Aguas, se identificaron 98 glaciares el año 2006.

### **3.3. LIMITACIONES**

Las principales limitaciones encontradas para la realización del presente estudio son, y como se describe más adelante en detalle, las siguientes:

Para que un glaciar sea reconocido como tal es necesario que posea movimiento por deformación bajo su propio peso, vale decir que posean un cierto espesor de hielo y eventual carga de detrito. Es posible que algunas formas identificadas como glaciares rocosos no posean éste espesor mínimo y, por lo mismo no sean glaciares propiamente tales. La única forma cierta de discriminarlos es con trabajos y mediciones en terreno. Sin embargo, el que hayan presentado algunas características típicas de glaciares rocosos probablemente permite señalarlos, al menos provisoriamente, como tales.

Para el caso de la identificación de glaciares descubiertos, es una limitación definir áreas totales mediante un sistema automatizado, pues finalmente la digitalización manual supervisada es una herramienta que permite identificar características topográficas y morfológicas de un glaciar. Lo importante es utilizar imágenes satelitales de épocas estivales, para evitar la presencia de nieves de temporada, eso puede llevar a confusión al procesador de imágenes. En zonas cordilleranas con pendientes abruptas, las imágenes satelitales presentan sombras, por ello se puede cotejar con fotografías aéreas y satelitales la presencia de glaciares pequeños que no se definan en las sombras. Las grietas de los glaciares también generan sombras. Con la supervisión de otras imágenes o fotografías y el conocimiento en terreno, es posible considerar como un cuerpo glaciar los polígonos separados que se puedan generar en un software de procesamiento de imágenes.

En el caso de los glaciares de montaña y valle que se encuentran cubiertos en su zona de ablación se presenta dificultad para determinar las zonas cubiertas en una imagen Landsat ETM+ con resolución espacial de 15 m. Lo anterior, es de mayor dificultad en glaciares pequeños. Para ello, se utilizó como apoyo fotografías aéreas e imágenes Google Earth para poder delimitar la zona cubierta del glaciar. Esto es una limitación importante a considerar al momento de definir los límites, pues se están utilizando distintas escalas de trabajo para un mismo cuerpo glaciar.

Para el caso de los campos de nieve, los cuales de acuerdo a su definición se consideran glaciares si se presentan como hielo perenne por más de dos años. Esta es una limitante cuando no se cuenta con imágenes periódicas que revelen la existencia de este cuerpo de nieve por más de dos años. Se constató la presencia de campos de nieve en distintas imágenes y fotografías de distintos períodos para eliminar campos de nieve que no existan en otras imágenes de años consecutivos.

Para la determinación de cada campo de nieve se realizó una revisión exhaustiva de todas las imágenes satelitales y fotografías aéreas disponibles donde el campo de nieve se mantuviera presente. En el caso que el campo de nieve no apareciera en las imágenes recientes, a pesar de no ser las imágenes utilizadas como fuente de trabajo, se eliminaba el campo de nieve determinado en la clasificación supervisada.

### **3.4. MARCO CONCEPTUAL**

#### **3.4.1. Definición de glaciar**

Se considera que la mejor definición del término “glaciar” existente es aquella establecida por el GTOS (*Global Terrestrial Observing System*) de las Naciones Unidas, en su publicación de Marzo de 2007: *Assessing the status of the development of standards for the essential climate variables in the terrestrial domain – Progress report to the 26th meeting of the Subsidiary Body for Scientific and Technological Advice*. La traducción de esta definición es como sigue:

“Glaciar se define como una masa de hielo en la superficie terrestre, que fluye pendiente abajo (por deformación interna y por deslizamiento en la base), y restringida por la topografía del entorno (por ejemplo las laderas de un valle o las cumbres que lo rodean); la topografía del lecho es la mayor influencia en la dinámica y pendiente de la superficie de un glaciar. El glaciar se mantiene por la acumulación de nieve en las cotas altas, balanceada por la fusión a cotas bajas o por la descarga al mar (IPCC, 2001). Casquete de hielo es una masa en forma de domo y que cubre la zona alta de una región (menor que 50.000 km<sup>2</sup> de área terrestre) que es considerablemente menor en extensión que las sábanas de hielo (IPCC, 2001)”.

La definición de glaciar de UNESCO/IASH (1970, *Perennial ice and snow masses, Technical Papers in Hydrology, Nº 1, Paris*) es similar a la de arriba, agregando que la superficie mínima de un glaciar, para efecto de inventario en imagen Landsat, debe ser de una hectárea, aun reconociendo que pueden existir glaciares de menor tamaño.

También es similar a la definición del GTOS aquella del IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change, Working Group I*) del 2001 que define a un glaciar como: “Una masa de hielo terrestre que fluye pendiente abajo por gravedad (debido a una deformación interna y/o deslizamiento en la base) y restringido por la topografía, por ejemplo ladera de valle o cumbres de su entorno; la topografía del lecho es la mayor influencia en la dinámica y pendiente de la superficie del glaciar. Un glaciar se mantiene por acumulación de nieve en sus cotas altas, balanceada por fusión a cotas más bajas o por descarga al mar”.

En relación con la definición de glaciar, es de relevancia indicar que la masa de hielo fluye por deformación interna, puesto que para que ello ocurra, debe existir un espesor mínimo

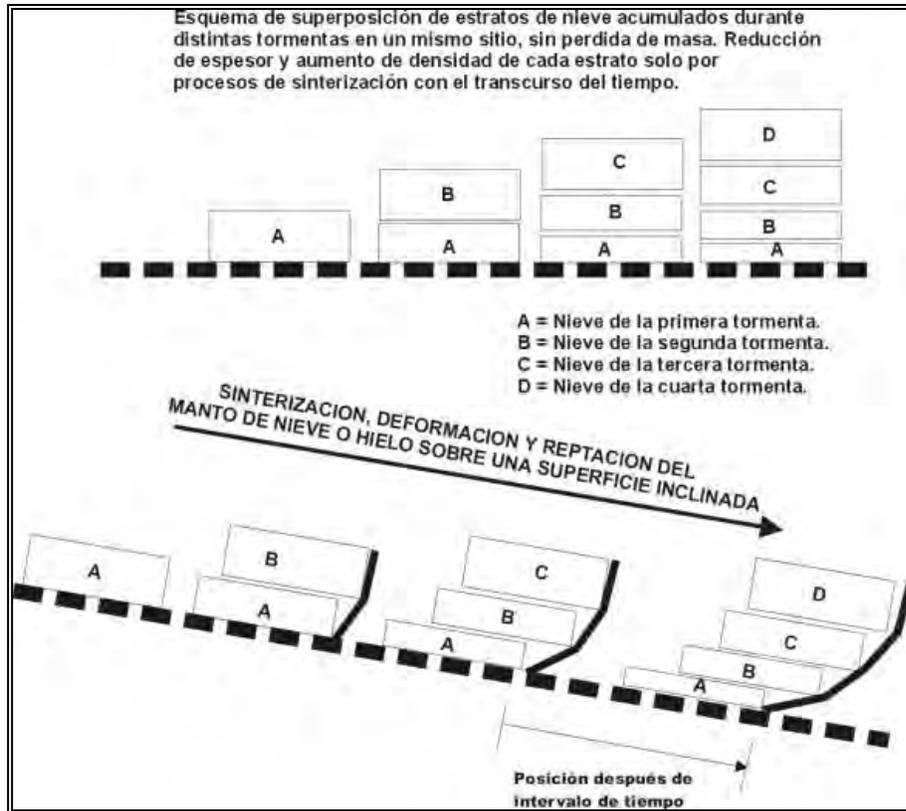
de hielo. El hielo se deforma visco-plásticamente con cargas de 50 a 100 kPa en glaciares templados (o temperados), esencialmente hielo a 0 °C, y del orden de 150 kPa en glaciares muy fríos. Con densidades del hielo de 900 kgm<sup>3</sup>, estas cargas equivalen a 5,5 m a 11,1 m de espesor de hielo en glaciares templados, y del orden de 15,6 m en glaciares muy fríos.

En glaciares rocosos con núcleo de hielo, con cargas unitarias mayores debido a la cubierta de detritos rocosos y a los detritos incorporados en el hielo, la deformación (flujo) del hielo se origina con espesores menores del hielo que aquellos necesarios en glaciares descubiertos.

Los glaciares fluyen cuando el hielo se desliza lentamente sobre el lecho basal si éste tiene una temperatura de 0 °C. **Estos glaciares se conocen como glaciares “templados” o “temperados”.** Este es el caso de la gran mayoría de glaciares en la Cordillera de los Andes.

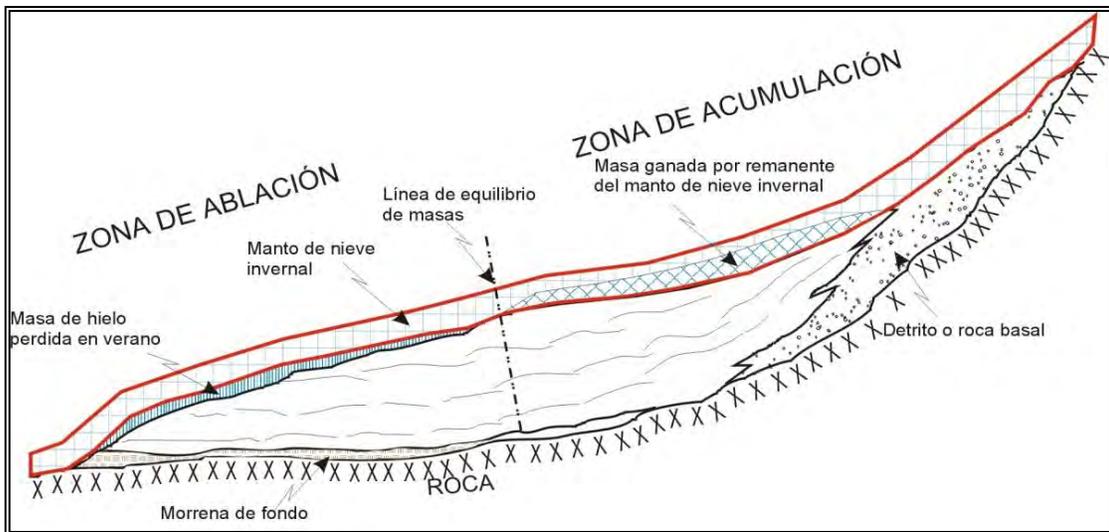
Si el hielo en la base del glaciar se encuentra a temperaturas negativas, los cuales **corresponden a glaciares “fríos”, el glaciar no se desliza sino que se adhiere al material sub-glacial** y el glaciar fluye solamente por deformación de la masa de hielo (Figura 3.4.1-A).

Los glaciares poseen una Zona de Alimentación (el área a mayor cota) y una Zona de Ablación (el área a menor cota), separadas por una imaginaria Línea de Equilibrio de masas (Figura 3.4.1-B). En la Zona de Alimentación el glaciar gana masa en un balance anual, mayoritariamente la nieve proveniente de la precipitación nival y de avalanchas más el detrito que estas últimas suelen incorporar, y que logra subsistir al término de la temporada veraniega. En la Zona de Ablación el glaciar pierde masa, por los diversos fenómenos de ablación (fusión, sublimación, erosión eólica, etc.). El frente del glaciar es estable cuando el balance anual de masas es igual a cero, vale decir cuando gana tanta masa de nieve en la Zona de Acumulación, como la masa perdida de hielo en la Zona de Ablación; en caso contrario el frente avanza (balance positivo, ganancia neta anual de masa) o retrocede (balance negativo, pérdida neta anual de masa) y se modifica el perfil de la superficie del glaciar.

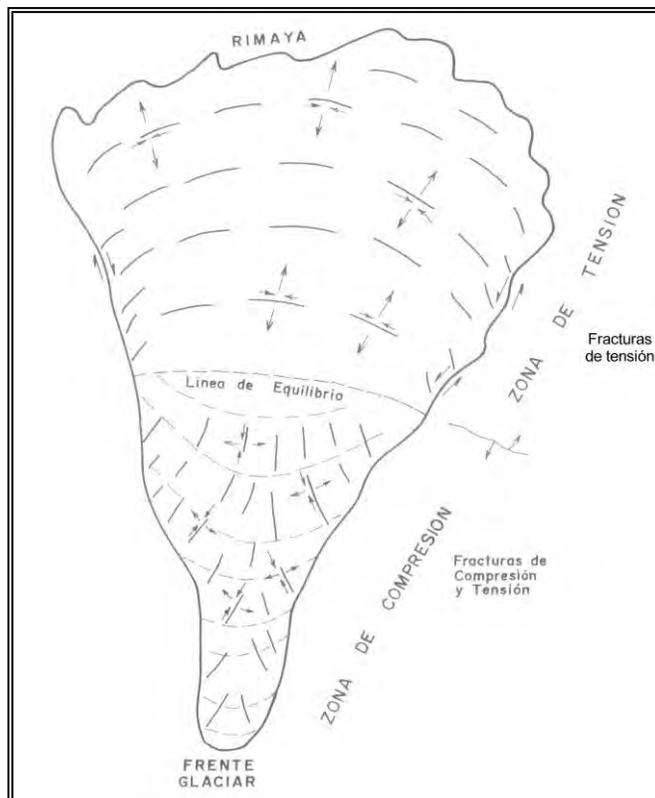


**Figura 3.4.1-A. Esquema de sinterización del manto de nieve y deformación y reptación del manto de nieve o glaciar.**

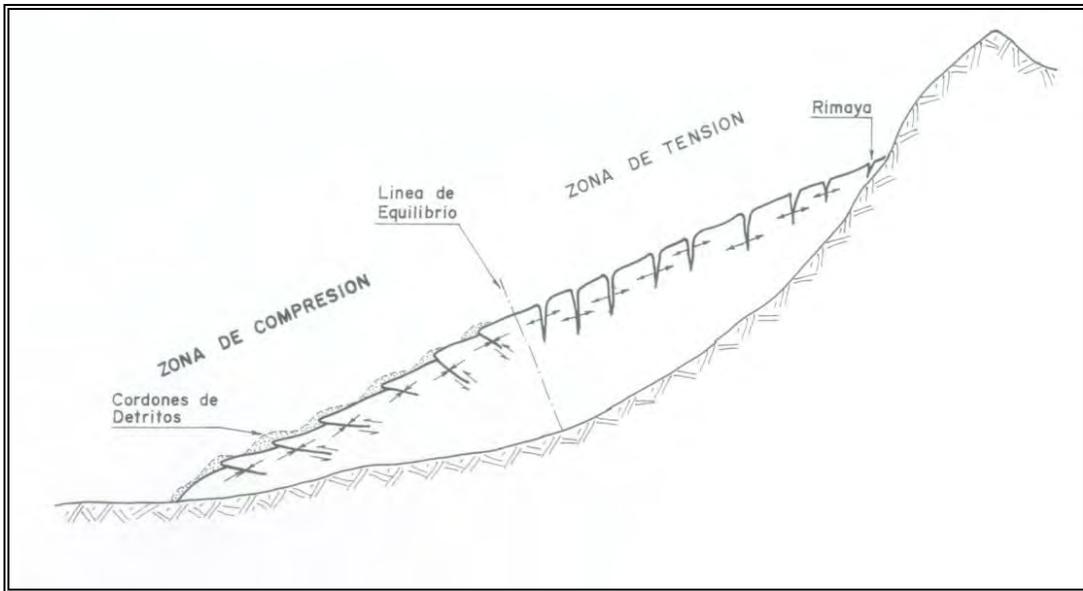
En la línea de equilibrio, por las mismas condiciones de intercambio de masas entre las zonas de acumulación y ablación, los espesores de hielo son mayores y por ello las velocidades de desplazamiento del glaciar son también las mayores. Por lo mismo, la Zona de Acumulación se encuentran en tensión y formación de grietas transversales (Figura 3.4.1-C), mientras que la Zona de Ablación es un campo en compresión, con formación de grietas longitudinales y cordones de compresión; esta disposición general del campo de esfuerzos puede alterarse por grandes ondulaciones en la base del glaciar. La disposición general de las grietas en la superficie de un glaciar se muestra en la figura 3.4.1-D.



**Figura 3.4.1-B. Perfil vertical por el eje de un glaciar, mostrando la disposición de las zonas de acumulación y de ablación.**



**Figura 3.4.1-C. Esquema en planta del campo teórico de esfuerzos en un glaciar y la disposición de los sistemas de fracturas en la masa de hielo.**



**Figura 3.4.1-D. Esquema de disposición teórica de fracturas en un perfil vertical por el eje de un glaciar.**

Las velocidades en superficie de desplazamiento de los glaciares dependen del espesor del hielo y de la deformación de éste según la ley de flujo del hielo, de la carga que representa el detrito incorporado con sus respectivas densidades, de la pendiente de la base y de la velocidad basal. La pendiente en la superficie de los glaciares es función del intercambio de masas entre las zonas de acumulación y de ablación y de las velocidades por ello originadas, y de la pendiente en la base del glaciar. La velocidad basal depende del esfuerzo de corte en la base del glaciar, el que, a su vez, depende del espesor del glaciar y su densidad media, la pendiente de la superficie del glaciar y el efecto de "pistón hidráulico" por la presión de agua en la base (el que a su vez tiene que ver con las inclinaciones de las rugosidades basales). La velocidad basal también depende de la rugosidad del terreno sobre el cual el glaciar desliza.

En la base del glaciar existe una banda de hielo con abundante material detrítico (del orden de 50%), el que es capturado del lecho (rocoso o detrítico) e incorporado a la masa de hielo del glaciar. Esta banda se denomina morrena basal y su límite inferior es el límite inferior del glaciar. En glaciares relativamente pequeños, como aquellos de las cuencas del estudio, la morrena basal suele tener espesores que van desde pocas decenas de centímetros hasta pocos metros. La característica geotécnica del material de hielo y detrito rocoso de la morrena basal es de cohesión aproximadamente  $100 \text{ kg/cm}^2$ , y ángulo de fricción interna aproximadamente  $38^\circ$ .

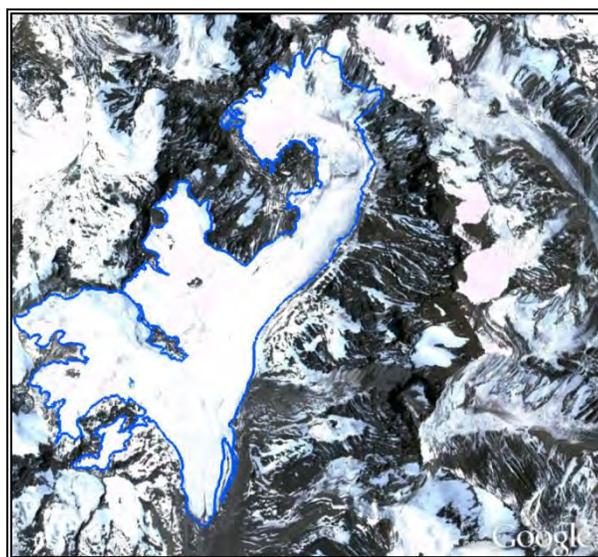
No deben mencionarse como “glaciares” geoformas que no estén constituidas por hielo, o por mezclas de hielo y detritos. En particular, no son glaciares geoformas que son depósitos de materiales detríticos transportados por glaciares actuales o en el pasado; estas geoformas corresponden, habitualmente, a algunos de los tipos de “morrenas”.

Tampoco son glaciares, geoformas con hielo, pero de espesor de hielo insuficiente como para deformarse por su propio peso (incluido el del hielo y el de la eventual sobrecarga de detritos rocosos). Estas geoformas, con espesores de hielo insuficiente para deformarse, deben mencionarse como constituidas por “hielo inactivo”.

Los “campos de nieve”, son extensiones de nieve que pueden persistir dos o más años, pero que no tienen espesores (y cargas) suficientes como para deformarse por su propio peso. Sin embargo, por propósitos hidrológicos UNESCO los incorpora con el número “7” correspondiente a la clasificación “Glaciarrete / Campo de nieve”. Las rampas de protalus se denominan en este inventario con el código RP.

### **3.4.2. Tipología de glaciares consideradas en el inventario**

**Glaciar descubierto:** Glaciares con cantidades imperceptibles de impurezas y que, por lo tanto, se aprecian esencialmente blancos, se denominan glaciares descubiertos. (Figura 3.4.2-A).



**Figura 3.4.2-A. Ejemplo de Glaciar Descubierto “Juncal Sur”. Cuenca del río Maipo. No se observan impurezas perceptibles ni detritos en el área del glaciar.**

**Glaciar Cubierto:** El contenido de detritos presentes en un glaciar puede alcanzar más del 20% de su volumen total. Entre los glaciares descubiertos y los glaciares de roca existe una amplia gama de glaciares con cubiertas detríticas que se extienden en sólo parte de sus zonas de ablación. Estos glaciares se denominan “glaciares con cubierta de detritos”, o “glaciares cubiertos” debido al grado de impurezas que contienen. En la figura 3.4.2-B se observa un ejemplo de glaciar cubierto.



**Figura 3.4.2-B. Glaciar al oeste de glaciar Marmolejo. Ejemplo de glaciar cubierto, Cuenca del río Maipo. Se observa una zona de acumulación sin impurezas y una capa de detritos en la zona de ablación del glaciar.**

**Glaciarete y Campo de Nieve:** Como glaciarete se ha considerado todos los glaciares entre 1 y 2 ha de superficie, según las definiciones de la Estrategia Nacional de Glaciares, (DGA, 2009) en la cual se han considerado como campo de nieve a todo cuerpo de hielo que se conserva por dos años o más. Tanto los campos de nieve como los glaciaretes se han inventariado como “*Glaciarete/Campo de Nieve*”.

**Glaciar Rocosos y Rampa Protalus:** Los glaciares rocosos son masas de hielo cubiertas por detritos rocosos (Figura 3.4.2-D), y con detritos rocosos dispersos en el núcleo de hielo del glaciar, en diversas proporciones (generalmente entre el 20% y 30% en volumen) (Marangunic, P. y Marangunic, C. 2010). Sus frentes son abruptos y ocasionalmente algo húmedos, poseen cordones elongados en la superficie de las zonas

de acumulación del glaciar y arcos transversales de compresión en superficie en las zonas de ablación.

**UNESCO define un glaciar rocoso como “masa con aspecto de glaciar, compuesta de rocas angulosas con hielo, neviza, o nieve intersticial o cubriendo los remanentes de un glaciar, y que se mueve lentamente pendiente abajo” (Müller *et al.*, 1977).**

En general, y según la forma en superficie se suelen distinguir dos tipos de glaciares rocosos:

- a) Glaciar rocoso con núcleo de hielo
- b) Rampa o lóbulos Protalus

Barsch (1996) distingue *debris rock glaciers* y *talus rock glaciers* según el origen del material que compone el glaciar, ya que el tipo, o volumen de hielo de un glaciar rocoso es una característica generalmente desconocida. Sin embargo, éstas son geoformas diferentes, aunque ambas son características de ambientes fríos de montaña (Whalley y Azizi, 2003).

Los lóbulos o rampas protalus son mayormente geoformas aceptadas como de origen no-glaciar. Los lóbulos serían originados por manchones de nieve en las laderas que han sido sepultadas por escombros rocosos, los cuales protegen la nieve/hielo de los factores climáticos y ayudan a la conservación de las geoformas (Año Internacional Geofísico, abreviado AGI, 1957).

Una imagen característica de un glaciar de roca se muestra en la figura 3.4.2-C.

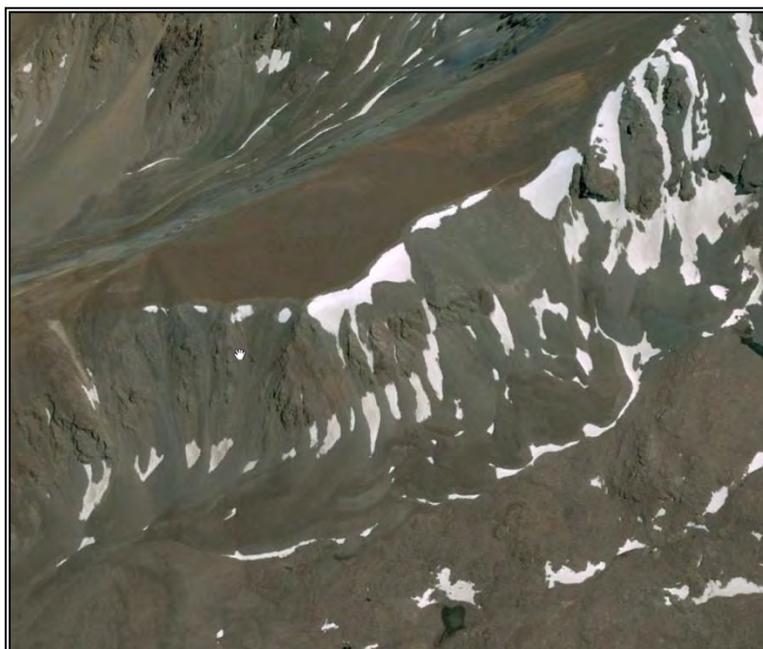


**Figura 3.4.2-C. El glaciar de roca Pedregoso, Chile.**



**Figura 3.4.2-D. Zanja en un glaciar de roca, glaciar Monolito en la cordillera de la zona central de Chile.**

Una imagen característica de geoformas de lóbulos Protalus se muestra en la figura 3.4.2-E. El término "talus" se aplica a la acumulación de fragmentos de rocas al pie de abruptas laderas, o al pie de farellones rocosos.



**Figura 3.4.2-E. Depósitos de lóbulos y rampa Protalus al pie de laderas cubiertas de talus. Cuenca del Río Maipo.**

### 3.5. METODOLOGÍA

#### 3.5.1. Recopilación

Se ha realizado una extensa revisión de la bibliografía referente al inventario de glaciares en Chile y en el mundo. Además de la recopilación de antecedentes sobre glaciares e inventarios de glaciares, esta actividad incluye la revisión bibliográfica utilizada para definir glaciares de acuerdo a la metodología especificada en la propuesta para el área de estudio.

#### 3.5.2. Adquisición de materiales y procesamiento de información

Las técnicas y procesos que ofrecen las tecnologías asociadas a la percepción remota y los SIG han permitido identificar coberturas de nieve y de hielo a través de la fotointerpretación y del procesamiento de imágenes satelitales (Chuvieco, 2004; Barcaza y Aniya, 2007). Lo anterior, debido al comportamiento espectral de la nieve y el hielo.

La percepción remota permite identificar glaciares y realizar estudios multitemporales. Lo anterior cobra importancia en el trabajo de identificar variaciones de estas masas de hielo en el tiempo. En la tabla 3.5.2-A (Barcaza y Aniya, 2007) se mencionan las principales aplicaciones en glaciología sobre la base de los sensores disponibles en la actualidad y el comportamiento espectral de los distintos tipos de coberturas de nieve y glaciares.

**Tabla 3.5.2-A. Principales aplicaciones glaciológicas con sensores remotos.**

<b>Aplicaciones</b>	<b>Sensores</b>
Cubierta de nieve y hielo	TM, ETM+, AVHRR, SPOT, MODIS
Cambios frontales y superficiales	MSS, TM, ETM+, RADARSAR -1, ASTER, IKONOS, Quickbird, Cámara Fotogramétrica
Facies glaciares	TM, ETM+
Línea de neviza	SEASAT, ERS-1/2, RADARSAR -1
Cambios de volumen/DEMs	SRTM, ASTER, ATM, LIDAR
Línea de nieve/Altitud línea de equilibrio	MSS, TM, ETM+, SPOT
Velocidad del flujo de hielo	TM, ETM+, ASTER, SIR-C, ERS-1/2, RADARSAT-1, ENVISAT
Glaciares de roca	IKONOS, Quickbird, Cámara Fotogramétrica

En la tabla 3.5.2-B se presentan los materiales que se han utilizado. Las imágenes Landsat ETM+ y los Modelos de Elevación Digital (MDE) han sido descargadas de forma gratuita vía Internet. Estas imágenes se pueden descargar en formato TIFF y se encuentran previamente georreferenciadas.

**Tabla 3.5.2-B. Materiales adquiridos para el inventario de glaciares.**

<b>Nombre</b>	<b>Formato</b>	<b>Aplicación</b>
Landsat ETM+ (con banda pancromática)	GEOTIFF	Identificación glaciar descubierto
Aster DEM Global Digital Elevation Model	GEOTIFF	Generación de topografía
Imágenes Spot 5, extraídas de la aplicación Arc2Earth	JPG	Identificación de glaciar rocoso
Fotografías Aéreas SAF 1: 50.000 (entre 1996 y 2002)	TIFF	Apoyo en identificación de glaciar rocoso
Cartografía Digital IGM 1: 50.000	SHAPE	Apoyo para información topográfica

En la tabla 3.5.2-C se muestran los software utilizados para el procesamiento de las imágenes satelitales y la delimitación de los glaciares en el área de estudio.

**Tabla 3.5.2-C. Software utilizados en el inventariar los glaciares.**

<b>Nombre</b>	<b>Principales aplicaciones</b>
<i>ArcGis</i> 9.3 + aplicación Arc2Earth	Generación y edición de información asociada al inventario de glaciares. Integración de las bases de datos para cálculos asociados a las características de los glaciares.
Idrisi Andes	Procesamiento de las imágenes satelitales Landsat ETM+
<i>Google Earth</i> Pro	Primer avistamiento a la presencia de glaciares rocosos en el área de estudio. Identificación de glaciares rocosos. Corroboración de aspectos morfológicos de glaciares rocosos y descubiertos
<i>Global Mapper</i> 11	Transformación de formatos de las bases de datos utilizadas, como complemento a las opciones que ofrece <i>ArcGis</i> 9.3

La fuente topográfica fue generada en base a los MDE obtenidos del Global Aster MDE (<http://www.gdem.aster.ersdac.or.jp/>) los cuales son imágenes ráster con dato de elevación asociados a un píxel. El Aster GDEM tiene 20 metros de precisión vertical y 30 metros de precisión horizontal. Para la generación de la topografía se utilizó la aplicación Generate Contours del software *Global Mapper* 11. La base de datos generada corresponde a curvas de nivel en formato shape adecuada al sistema de coordenadas UTM y Datum WGS84. La equidistancia de las curvas generadas corresponde a 30 m.

La fuente de datos utilizada para la generación de topografía fue descargada gratuitamente desde el sitio. Los detalles de cada imagen se muestran en la tabla 3.5.2-D.

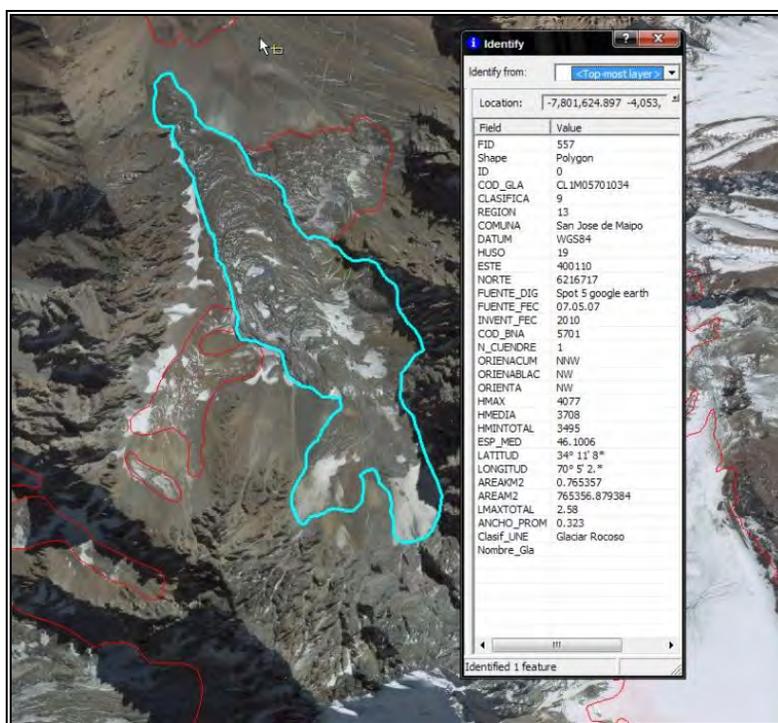
**Tabla 3.5.2-D. Detalle de ASTER DEM utilizados en el área de estudio utilizadas en el inventario de glaciares.**

<b>Cuenca</b>	<b>Nombre imagen</b>
Aconcagua	ASTGTM_S33W071_dem.tif
	ASTGTM_S34W071_dem.tif
Maipo	ASTGTM_S34W071_dem.tif
	ASTGTM_S35W071_dem.tif
Rapel	ASTGTM_S35W071_dem.tif
Mataquito	ASTGTM_S35W071_dem.tif
	ASTGTM_S36W071_dem.tif
Maule	ASTGTM_S36W071_dem.tif
	ASTGTM_S36W072_dem.tif
Maule	ASTGTM_S37W071_dem.tif
	ASTGTM_S37W072_dem.tif

### **3.5.3. Identificación de glaciares**

#### **3.5.3.1. Formato de los datos**

Los glaciares descubiertos y rocosos se han digitalizado en formato shape utilizando el software *ArcGis* 9.3 y 10. El formato de los datos asociados a este shape se encuentra en una tabla de atributos con extensión “dbf”, la cual es compatible con Excel y exportable a otros tipos de datos de tabla (el archivo generado de la tabla se entregará en formato “xls” a fin de visualizar rápidamente los datos sin la necesidad de contar con un SIG). Un ejemplo del registro de la información se muestra en la figura 3.5.3.1-A.



**Figura 3.5.3.1-A. Formato de inventario de glaciares de un glaciar rocoso y la columna correspondiente a los datos del polígono.**

Los rasgos distintivos de los glaciares rocosos cuando se visualizan en una imagen satelital o fotografía aérea son todo o al menos varios de los siguientes (Tabla 3.5.3.1-A).

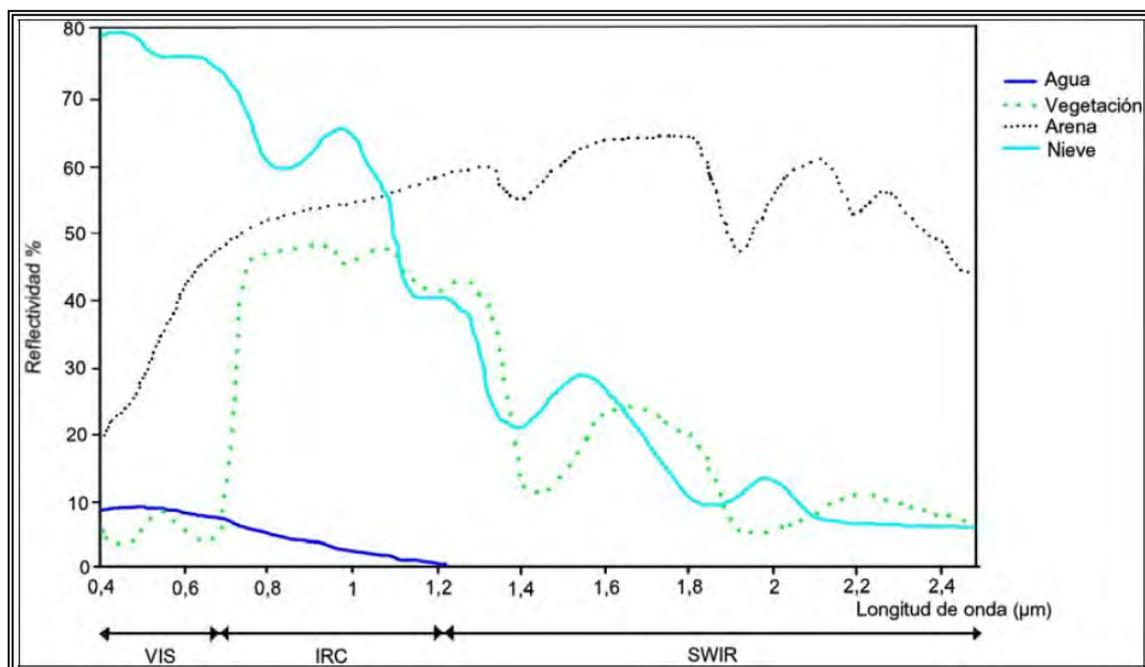
**Tabla 3.5.3.1-A. Rasgos distintivos de un glaciar rocoso en una imagen satelital o fotografía aérea.**

<b>Rasgo identificable</b>
Líneas de flujo, en particular en la Zona de Acumulación.
Anillos de compresión en la Zona de Ablación.
Frente activo abrupto, en el límite de estabilidad del material detrítico sin cohesión.
Ocasionalmente, sistemas de grietas longitudinales, transversales o marginales.
Posibles morrenas en las márgenes.
Cambios de tonalidad (generalmente superficies más oscuras debido a la humedad del detrito).
Eventuales drenajes en el frente.
Ausencia de vegetación en el detrito sobre el glaciar.

### 3.5.3.2. Identificación de glaciares descubiertos

Las técnicas más utilizadas para identificar glaciares descubiertos a partir de imágenes satelitales se basan en el comportamiento espectral de la cobertura glaciar, de la nieve y el hielo. Se debe señalar que si bien la nieve posee un comportamiento altamente

reflectivo de la luz solar, la curva espectral de la nieve es bastante constante, tal como lo muestra la figura 3.5.3.2-A, la composición de un glaciar descubierto formado por la recristalización de la nieve, cualquiera sea su forma y dimensión hacen un poco más complejo establecer áreas totalmente homogéneas de un glaciar ya que las bandas de las imágenes satelitales utilizadas para identificar hielo y nieve no siempre permiten distinguir entre nieve o neviza en el entorno o si corresponde al cuerpo de un glaciar. Para ello se deben elegir imágenes capturadas en fechas estivales, de preferencia en el mes de Febrero o Marzo. Se observa en la figura 3.5.3.2- B, que la nieve fresca posee la máxima reflectividad en el espectro visible y comienza a descender en el infrarrojo medio. El hielo glaciar, muestra un comportamiento similar a la nieve fresca, con un porcentaje de reflectividad de valores más bajos y el hielo refundido también presenta una curva similar al hielo glaciar, con un porcentaje de reflectividad menor a éste. La fusión y compactación de la nieve, es decir hielos refundidos y compactados, poseen menor reflectividad en el espectro visible.

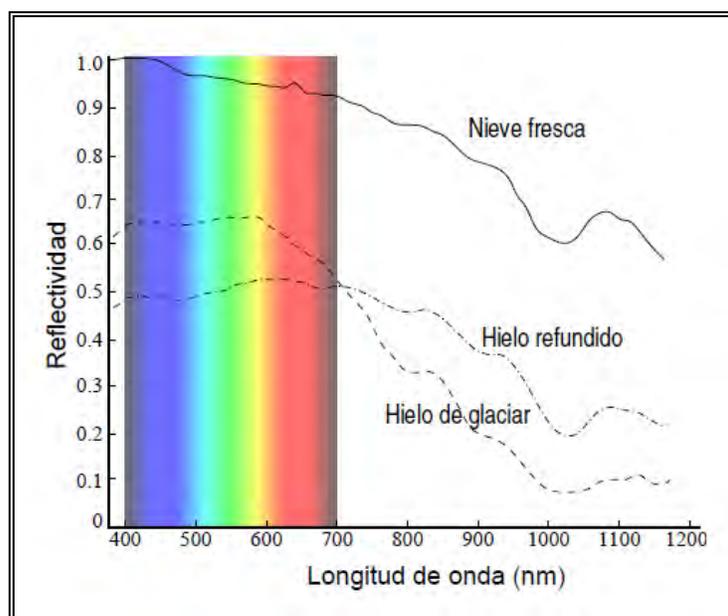


**Figura 3.5.3.2-A. Comportamientos espectrales del agua, vegetación arena y nieve (Chuvieco, 2004).**

El modelo de definición de colores usado en trabajos digitales es el modelo RGB (Red, Green, Blue). Para representar un color en el sistema RGB se le asigna un valor entre 0 y 255 (notación decimal) o entre 00 y FF (notación hexadecimal) para cada uno de los componentes rojo, verde y azul que lo forman. Por lo consiguiente un color cualquiera vendrá representado en sistema RGB. Los valores más altos de RGB corresponden a una

cantidad mayor de luz blanca. Por lo tanto mientras más altos son los valores RGB, más claros son los colores.

La nieve presenta altos valores, cercanos al máximo expresados entre el 0 y el 255 en el campo visible del espectro electromagnético, es decir las bandas correspondientes al rojo, al azul y al verde. El reflejo de la nieve o el hielo corresponde a un 90% de la energía incidente de la luz solar. El hielo de glaciar y el hielo refundido presentan valores digitales más bajos en el campo visible, sin embargo presentan bajos valores en el infrarrojo medio (correspondiente a la banda 5 de la Landsat).



**Figura 3.5.3.2-B. Comportamiento espectral de nieve fresca, hielo refundido y glaciar.**

\* Disponible en:  
<http://ocw.innova.uned.es/ocwuniversia/tecnologias-del-medio-ambiente>

Se han determinado técnicas que permiten cuantificar masas de glaciares y nieves perennes de forma casi automática a través de métodos que responden a este comportamiento espectral de la nieve y el hielo. Dentro de estas técnicas se pueden identificar las principales:

- **Band Ratio:** Este método procesa la imagen mejorando el contraste entre dos bandas dividiendo los valores de reflectancia de los píxeles de una banda por los píxeles de otra banda. Para establecer este contraste en una cobertura glaciar se divide la banda roja y la infrarroja de la imagen. Donde la banda roja presentará los valores más altos de reflectividad y la infrarroja valores bajos.

**BR= Roja/Infrarroja**

En el caso de las imágenes Landsat ETM+ corresponde las bandas 3 y 5 respectivamente.

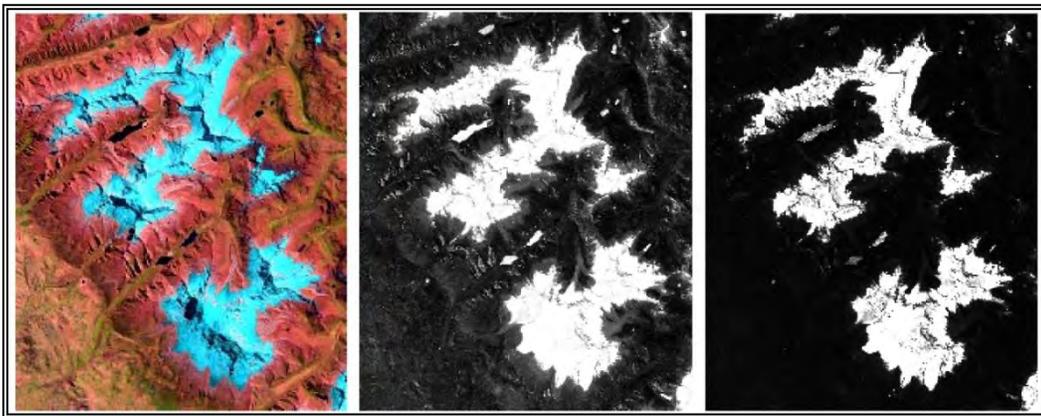
- **Índice Normalizado de Nieve NDSI (Normalized Difference Snow Index).**

El índice de nieve establece una relación entre la banda verde y la banda del infrarrojo medio. Los valores resultantes se deben interpretar y el usuario puede definir un umbral para determinar el elemento como nieve. En el caso de las imágenes Landsat ETM+ corresponde a las bandas 2 y 5 respectivamente.

**$NDSI = \frac{\text{verde} - \text{infrarrojo medio}}{\text{verde} + \text{infrarrojo medio}}$**

- **Falsos Colores:** Los falsos colores corresponden a combinaciones de tres bandas para facilitar la interpretación del usuario respecto a un elemento de la superficie terrestre. En el caso de las imágenes Landsat se utiliza la combinación RGB 742 y 543 para determinar cubierta glaciar. La combinación que utiliza la banda 7 permite discriminar un comportamiento térmico de la nieve, mientras la combinación 543 funciona muy bien discriminando entre nubes y nieves (Chuvieco, 2004).

Se pueden observar en la figura 3.5.3.2-C cómo se visualizan los métodos mencionados. Las superficies identificadas no presentan diferencias salvo en los cuerpos de agua, que en el NDSI podrían identificarse como cuerpos de nieve o hielo a menos que el intérprete constate con un falso color, color verdadero o bien con conocimiento previo del área de estudio.



**Figura 3.5.3.2-C. Métodos Falso Color 742, NDSI y Band Ratio 3/5 respectivamente utilizando una imagen Landsat.**

El método de clasificación supervisada presupone conocimiento del área de estudio, conocimientos avanzados de glaciología y la complementación de más de un método de procesamiento de imágenes que permitan determinar superficie glaciar.

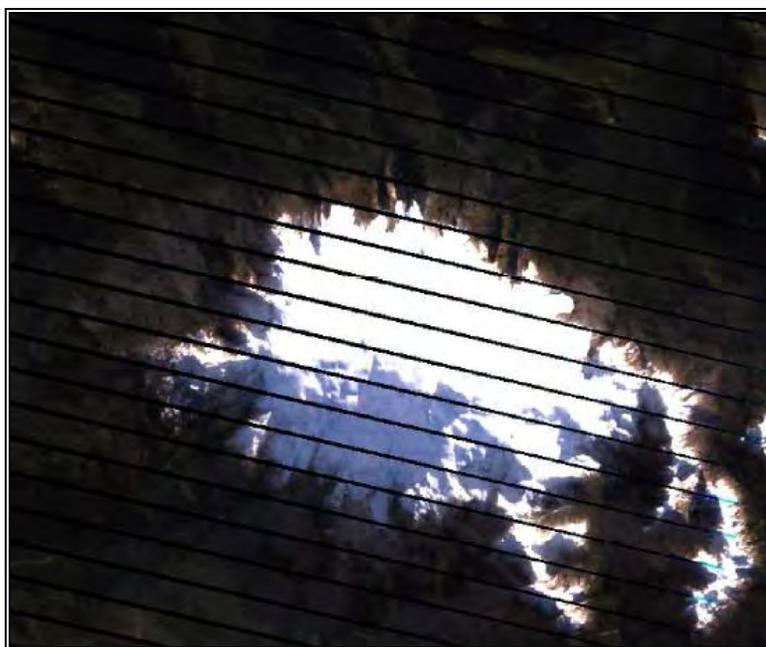
Como se mencionó en secciones anteriores, las imágenes utilizadas para este estudio corresponden a las bandas Landsat ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus). Estas imágenes se componen de 8 bandas, las cuales poseen distintas resoluciones espaciales. En la tabla 3.5.3.2-A se detallan los números de bandas, los rangos del espectro electromagnético que contienen asociada a su píxel y la resolución espacial de cada una de ellas.

Las imágenes mencionadas se descargaron de forma gratuita a través de la página web del Servicio Geológico de los Estados Unidos (<http://glovis.usgs.gov/>). Se ha considerado conveniente trabajar con las imágenes existentes entre los períodos 2000 y 2001, que no presenten una cobertura nubosa superior al 10%.

**Tabla 3.5.3.2-A. Detalles técnicos de la imagen Landsat ETM+.**

	<b>Banda espectro electromagnético</b>	<b>Resolución espacial (m)</b>
1	Azul	30
2	Verde	30
3	Rojo	30
4	Infrarrojo cercano	30
5	Infrarrojo medio	30
6	Infrarrojo termal	60
7	Térmico próximo	30
8	Pancromático	15

Se revisaron las imágenes disponibles en la Web y se observó que las imágenes posteriores al año 2003 muestran en su mayoría errores en la imagen (Figura 3.5.3.2-D).



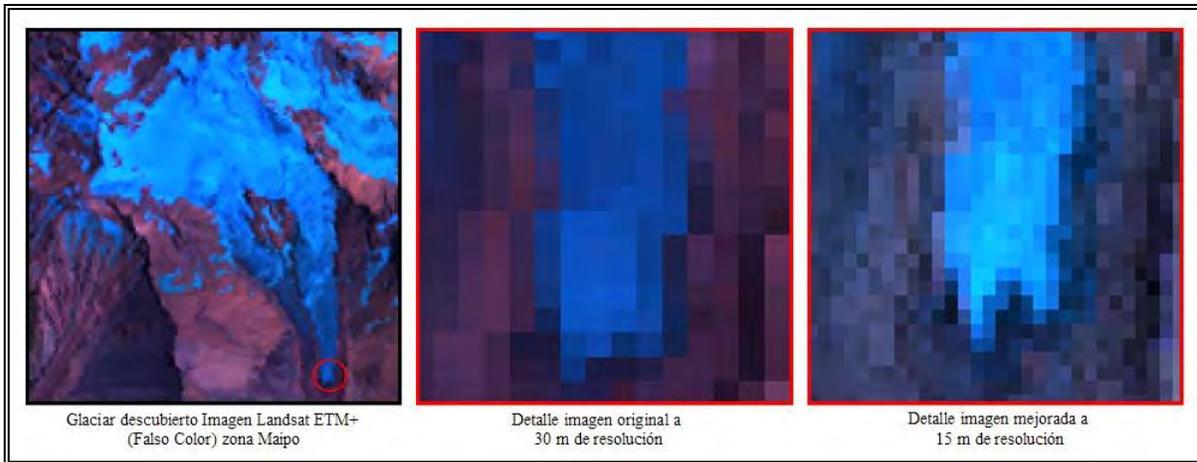
**Figura 3.5.3.2-D. Imagen Landsat posterior al año 2003 con errores (Vivero y Rivera, 2010).**

Las imágenes Landsat ETM+ utilizadas en este inventario se detallan en la tabla 3.5.3.2-B.

**Tabla 3.5.3.2-B. Detalles imágenes Landsat ETM+ utilizadas en el inventario de glaciares.**

<b>Cuenca</b>	<b>Nombre imagen</b>	<b>Fecha</b>
Aconcagua	No aplica	
Maipo	L71233083_08320000331	31-03-2000
	LE72320842001070EDC00	11-03-2001
Rapel	LE72330842001077EDC00	18-03-2001
Mataquito	LE72330842001077EDC00	18-03-2001
	LE72330852001077EDC00	18-03-2001
Maule	LE72330852001077EDC00	18-03-2001
	LE72320852000052EDC00	21-02-2000

Con el fin de mejorar la resolución espacial de las imágenes a 15 m, se utilizó la banda pancromática de las imágenes para realizar un pansharpening. La transformación de los datos se observa en la figura 3.5.3.2-E, donde se muestra una misma zona del área de estudio a una misma escala, con la resolución espacial original y la resolución espacial de 15 m.



**Figura 3.5.3.2-E. Aumento de la resolución espacial de una imagen Landsat ETM+ utilizando la banda pancromática de 15 m.**

De acuerdo a los métodos probados en el área de estudio, es importante destacar que la identificación automatizada de cobertura glaciar ofrece resultados satisfactorios utilizando sistemas como el band ratio para una primera aproximación a la discriminación de presencia de nieve y hielo, para excluir otros elementos existentes en la cordillera. A modo de prueba se realizó un método de clasificación no supervisada llamado Isoclust, el cual permite generar áreas que se comportan espectralmente igual. El resultado es bastante satisfactorio, si se establece como criterio que el programa agrupe elementos en categorías acotadas.

Dentro de los métodos de clasificación supervisada se delimitaron sitios de entrenamiento, que corresponden a polígonos digitalizados por un usuario que tiene seguridad de que un polígono determinado que desea digitalizar corresponde a un polígono en particular. En este caso, se utilizó como base un falso color 742 de fondo y se digitalizaron sitios de entrenamiento lo más representativos posible dentro de la imagen. Luego, con los polígonos digitalizados, se ejecutó la función MakeSig, el cual genera firmas espectrales, es decir gráficos de comportamiento de los sitios de entrenamiento de acuerdo a las distintas bandas incluidas en el falso color y se corroboró que las firmas espectrales coincidan con el comportamiento esperado de la nieve y hielo, como se ha explicado en este informe.

Una vez generadas las firmas espectrales de los polígonos marcados como "sitios de entrenamiento" se utilizó la función MinDist que realiza una clasificación de elementos utilizando el Método de la Distancia Mínima; el resultado de esta agrupación generó zonas que coinciden con los glaciares descubiertos identificados con los otros métodos. Sin

embargo, este sistema no permite discriminar, por ejemplo, dos glaciares colindantes que caen en dirección opuesta desde una misma cumbre. Es por ello, que la información topográfica es indispensable al momento de discriminar un cuerpo glaciar, junto a la supervisión de lo que el sistema podría reconocer como un cuerpo único.

En base los métodos revisados y a las observaciones comentadas sobre cada método expuesto, es posible concluir que las áreas definidas por el sistema como glaciar no cambian mayormente; sin embargo, se ha concluido que el sistema más satisfactorio para la delimitación de los glaciares descubiertos es una digitalización manual en base a lo que el usuario visualiza en pantalla con una combinación falso color base y corroborando con la imagen obtenida del band ratio. A modo de supervisión, se ha constatado con la utilización del software *Google Earth* la localización de la masa de hielo, y en el caso que las imágenes *Google Earth* lo permitan, se pueda comprobar que corresponden a nieves con permanencia de más de dos años o a glaciares descubiertos que muestren fracturas de tensión y fracturas de compresión en las imágenes.

### 3.5.3.3. Identificación de glaciares rocosos

Para la identificación de glaciares rocosos se realizó una revisión de las metodologías utilizadas para identificar estos elementos de forma sistematizada. En la tabla 3.5.3.3-A se muestran las principales fuentes disponibles en el mercado para la realización de este inventario de glaciares rocosos.

**Tabla 3.5.3.3-A. Descripción de las imágenes disponibles para la identificación de glaciares rocosos.**

Tipo de imagen	Descripción
IKONOS	Producidas por una empresa privada; son imágenes de alta resolución, de 1 a 4 m por píxel (1 en banda pancromática y 4 m en bandas espectrales).
QUIKBIRD y WORLDVIEW	Similar a IKONOS, son imágenes producidas por una empresa privada, <i>Digital Globe</i> , con resolución más alta de 50-60 cm. ( <a href="http://www.digitalglobe.com">www.digitalglobe.com</a> ),
SPOT y FORMOSAT-2	Producidas por <i>Image Spot</i> . Las imágenes pancromáticas tienen una resolución de 2 m, las multiespectrales son de resolución algo inferior. ( <a href="http://www.spotimage.fr">www.spotimage.fr</a> )
<i>GOOGLE EARTH</i>	Ofrece al público y libre de costos imágenes de la NASA (que son también las ofrecidas por el USGS) y SPOT en un

Tipo de imagen	Descripción
	sistema previamente georreferenciado.

Fuente: elaboración propia

Para determinar glaciares rocosos se ha requerido utilizar imágenes satelitales de alta resolución junto con el apoyo de fotografías aéreas en las zonas donde las imágenes no presenten buenas condiciones para identificar la presencia de un glaciar. Por ejemplo, cobertura nubosa que finalmente permite identificar figuras inciertas en las imágenes o fotografías.

Para identificar los glaciares rocosos se probaron distintos métodos. Con la ayuda del software **ArcGis** se visualizó en pantalla la resolución esperada para trabajar a escala 1:5.000 con imágenes Ikonos, con las que Geoestudios contaba en otras zonas fuera del área de estudio. No existen diferencias de resolución entre las imágenes que pueden visualizarse en **Google Earth** en relación a las imágenes Ikonos o **Quikbird** que cuentan con resoluciones espaciales de 4 m o 1 m, según el tipo de imagen. La diferencia radica en que el software **Google Earth**, de la empresa **Keyhole Inc**, ofrece una composición de imágenes que no necesariamente corresponde a imágenes de un mismo período de tiempo y pueden presentar resoluciones espaciales distintas. No obstante lo anterior, las imágenes disponibles en **Google Earth** son una herramienta poderosa para corroborar la existencia de glaciares. Se pueden identificar en detalle los límites del glaciar rocoso, sus frentes abruptos y visualizar en 3D las cuencas de alimentación.

Para solucionar el inconveniente que las imágenes obtenidas del software **Google Earth** no se encuentren georeferenciadas espacialmente, se vinculó el software google Earth con ArcGis a través de aplicación llamada Arc2Earth. Esta aplicación está elaborada para su uso en el software **ArcGis** y presenta al usuario versiones básicas de uso público y otras más complejas a la venta.

**Arc2Earth** permite guardar las imágenes georreferenciadas según el sistema de georreferenciación de Google Maps. Así la digitalización en pantalla de los glaciares rocosos se realiza en base a esta aplicación (se corrige el datum y sistema de coordenadas). Es posible guardar las imágenes y vincular la información de la topografía existente en el mismo software.

En el caso que las imágenes no se mostraran claras para la identificación de glaciares, se utilizó fotografía aérea escala 1:50.000. Para algunas zonas de la cuenca del río Maipo y

Maule, estas fotografías fueron adquiridas. Para las cuencas del río Aconcagua y río Mataquito se contaba con fotografías aéreas proporcionadas por la Dirección General de Aguas. Las fotografías adquiridas son entregadas en formato digital a la Dirección General de Aguas.

### **3.5.4. Inventario de glaciares**

#### **3.5.4.1. Variables incluidas en las tablas de atributos del inventario de glaciares**

Para la ejecución de inventarios de glaciares existen actualmente dos procedimientos:

1. Recomendaciones de UNESCO para el inventario de glaciares, originadas en la Comisión Internacional de Nieve y Hielo de la Asociación Internacional de Hidrología Científica y utilizadas en el WGI (*World Glacier Inventory*). UNESCO (1970); Müller *et al* (1977) y Müller (1978).
2. Recomendaciones de la *Global Land Ice Measurements from Space*, GLIMS, una iniciativa de glaciólogos de varios países buscando el empleo de imágenes satelitales para la confección de inventarios de glaciares. Rau *et al* (2005), Raup y Khalsa (2006), GLIMS (2006).

Las recomendaciones UNESCO y del WGI tienen como objetivo la ejecución de inventarios de glaciares basados en antecedentes de terreno, fotografías aéreas y mapas. Las recomendaciones de la iniciativa GLIMS se han ideado para realizar inventarios de glaciares en base a imágenes satelitales; estas recomendaciones se basan en la norma de UNESCO y sólo difieren de ella en cuanto exigen la recopilación de menos antecedentes que aquellos solicitados por las recomendaciones UNESCO. Este menor número de antecedentes se refiere a parámetros de las recomendaciones UNESCO que pueden ser difíciles de obtener sólo de imágenes satelitales. Por lo mismo, los inventarios con las recomendaciones GLIMS son menos completos que aquellos realizados con las recomendaciones UNESCO.

El World Glacier Monitoring Service (WGMS) que analiza, esencialmente, la fluctuación de glaciares, también emplea las recomendaciones UNESCO para su catastro de glaciares, al igual que en la mayoría de países en los que se ha realizado el catastro. Por lo demás,

éstas son las normas con que se han realizado la mayoría de los inventarios de los glaciares en las cuencas hidrológicas de Chile.

En concordancia con lo anterior, este catastro se ha realizado bajo las recomendaciones UNESCO y teniendo en consideración la información mínima que debe incluir el inventario según resolución N°1851 de la DGA.

Por acuerdo internacional, todo lo referente al inventario de glaciares se expresa en idioma inglés, sin embargo para fines de este estudio, la información será entregada en español.

1. Código del glaciar definido por el World Glacier Inventory (WGI) (COD\_GLA): El número del glaciar es un código de 12 caracteres, que se forma combinando los siguientes elementos (Tabla 3.5.4.1-A).

**Tabla 3.5.4.1-A. Detalle del código de glaciar definido por la WGI.**

<b>N° de caracteres</b>	<b>Atributo Indicado</b>	<b>Carácter Utilizado en el inventario</b>
2	País o unidad política*	RC
1	Continente	1 (América del Sur)
4	Cuenca	M y el número de cuenca según código DGA
2	Libres	Sub y sub-subcuencas según código DGA
3	Numeración del glaciar	Número asignado al glaciar

\* Según estándar ISO 3166, el código que corresponde a Chile es "CL", anteriormente el WGI empleaba los caracteres "RC". Por lo anterior, en este inventario se entrega el inventario tanto con el prefijo "RC" y "CL".

El primero de los cuatro caracteres que señalan la cuenca indica las cuencas mayores en que se divide el continente. Para el caso de América del Sur, y específicamente Chile, la letra "L" identifica a Chile austral, que representa a la zona ubicada al Sur de la cuenca hidrográfica "103" Río Bueno (al Sur de Osorno); la letra "M" al centro del país, entre las cuencas hidrográficas Río Bueno y Río Elqui, (ambas incluidas); y la letra "N" el Norte del país, que corresponde a la zona ubicada al Norte de la cuenca "043" Río Elqui.

Los tres caracteres siguientes identifican a la cuenca hidrográfica en particular. En Chile, existe la numeración de cuencas hidrográficas realizada por la Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas. Por ejemplo, "054" es la cuenca del río Aconcagua en la Región de Valparaíso, la cuenca "057" corresponde a la cuenca del río Maipo en la Región Metropolitana, y la cuenca "060" es la cuenca del río Rapel en la Región del Libertador Bernardo O´Higgins.

Los dos caracteres de libre empleo, se utilizarán en este estudio para identificar la sub-cuenca y la sub-subcuenca donde se encuentre ubicado el glaciar, esta información ha sido proporcionada por la Dirección General de Aguas (DGA), en formato *shape*.

Los tres caracteres siguientes se emplean para la numeración del glaciar, generalmente ordenándolos en el sentido del movimiento de las manecillas de un reloj.

Un ejemplo de nomenclatura de glaciar para este inventario es **“RC1M05701137”**.

RC ó CL= Chile  
 1= América del Sur  
 M= Zona Central  
 057= Cuenca Maipo  
 0= Subcuenca (DGA)  
 1=Subsubcuenca (DGA)  
 137= Número del glaciar (entre 0 y 999).

2. Nombre del glaciar (NOMBRE): El nombre del glaciar debe escribirse en letras mayúsculas. No todos los glaciares poseen nombre; algunos pueden identificarse solamente como un número en una cuenca o en una región.
  
3. Clasificación (CLASIFICA): Corresponde al primer dígito de clasificación primaria de un glaciar según normas UNESCO/WGI. Los tipos de glaciares se indican en la tabla 3.5.4.1-B.

**Tabla 3.5.4.1-B. Detalle del código de glaciar definido por la WGI.**

Número identificador	Tipo de glaciar
0	Incierto o misceláneo
1	Sábana de hielo continental
2	Campo de hielo
3	Casquete de hielo
4	Glaciar de desagüe
5	Glaciar de valle
6	Glaciar de montaña
7	Glaciarrete/Campo de Nieve
8	Plataforma de hielo
9	Glaciar rocoso

4. Región (REGION): Número de la región de Chile donde se sitúa el glaciar. La numeración va del número 1 al 15.

5. Comuna (COMUNA) en donde se sitúa el glaciar.
6. Sistema de referencia (DATUM): En este estudio corresponde al sistema WGS84.
7. Zona cartográfica (HUSO): En las cuencas que comprenden el área de estudio el huso correspondiente es 19S.
8. Coordenadas Este (ESTE): Corresponde a la coordenada Este del centroide del polígono expresadas en coordenadas UTM.
9. Coordenadas Norte (NORTE): Corresponde a la coordenada Norte del centroide del polígono expresadas en coordenadas UTM.
10. Coordenadas Norte (NORTE): Corresponde a la coordenada Norte del centroide del polígono expresadas en coordenadas UTM.
11. Altitud mínima del glaciar expresada en m.s.n.m. (HMINTOTAL).

Los siguientes campos se incluyen en el inventario de forma complementaria.

1. Latitud. Es la latitud en que se encuentra el glaciar, en grados y decimales de grado. La latitud Sur es negativa, por ejemplo -35.97134 en Chile. Los números enteros se separan de los decimales por punto. Es conveniente señalar un punto al medio de la Zona de Acumulación del glaciar.
2. Longitud. Es la longitud en que se encuentra el glaciar, en grados y decimales de grado. La longitud Oeste es negativa, por ejemplo -71.43656 en Chile. Los números enteros se separan de los decimales por punto. Es conveniente señalar un punto al medio de la Zona de Acumulación del glaciar.
3. Número de cuencas. Es el número de cuencas hidrográficas hacia las cuales drena el glaciar. Si es una sola, colocar 1. En algunos casos es posible que una masa de hielo descargue hacia más de una cuenca o subcuenca hidrográfica. Cuando no es posible dividir la masa de hielo en glaciares menores descargando uno en cada cuenca, debe colocarse el número de cuencas a las cuales vierte el glaciar.

4. Área en el estado. El área total del glaciar en un estado político particular. Si el glaciar se encuentra en un solo país, esta área será igual al área total. Si el glaciar se extiende en dos o más países, aquí debe colocarse el área del glaciar que corresponde al país en el cual se realiza el inventario. El área se expresa en kilómetros cuadrados. Este casillero puede dejarse en blanco si todo el glaciar se encuentra en un solo estado. En las bases no se especifica esto, pues el área a medir debe ser sólo la parte que abarca el territorio nacional.
  
5. Área cubierta. Es el área de hielo libre de cubiertas detríticas u de otro material (por ejemplo, sobrecarga artificial con botaderos de detritos rocosos). Se expresa en kilómetros cuadrados. En este inventario, las áreas cubiertas y descubiertas de los glaciares están identificadas en polígonos diferentes y existe una columna **llamada "NOTA" en la cual se diferencian estas áreas.**
  
6. Ancho medio. Es el ancho medio del glaciar, expresado en kilómetros. Si el glaciar tiene un ancho uniforme en su lengua terminal, como ocurre con glaciares de valle o de desagüe, el ancho medio debe medirse allí. En caso contrario, es preferible dejar este casillero en blanco, pues un ancho medio puede obtenerse a partir de la superficie total del glaciar y el largo medio.
  
7. Largo medio. Es la longitud media del glaciar, expresada en kilómetros. Este es el promedio de la longitud de cada tributario, medida a lo largo de la línea de flujo más larga hasta el frente del glaciar.
  
8. Orientación de la Zona de Acumulación. Es la orientación (o aspecto) general del área de acumulación del glaciar. Se refiere al punto cardinal hacia donde mira la mayor superficie del glaciar. Expresada en grados; por ejemplo el Norte es 0, el Este es 90, el Sur es 180, el NNW es 315, etc. El valor de -360 se emplea en un casquete de hielo que se orienta en todas direcciones. En este inventario se entregan en direcciones N-S-E-W.
  
9. Orientación de la Zona de Ablación. Se refiere a la orientación (o aspecto) general de la Zona de Ablación del glaciar. Expresada en grados; por ejemplo el Norte es 0, el Este es 90, el Sur es 180, el NNW es 315, etc. El valor de -360 se emplea en un casquete de hielo. N-S-E-W

10. Cota media. Es la cota media del glaciar, expresada como metros sobre el nivel del mar. Es la curva de nivel que divide al glaciar en mitades. Expresada en metros sobre el nivel del mar.

11. Espesor. En este inventario se utilizan como referencia dos fórmulas para determinar el espesor de un glaciar. La primera corresponde a la fórmula empleada por Chen y Ohmura (1990). Esta fórmula se basa en la experiencia en grandes glaciares en general.

Se establece la siguiente correlación entre la superficie de un glaciar y su espesor medio:

$$Y = A * X^B$$

Donde  $X$  es el área del glaciar (en kilómetros cuadrados) e  $Y$  es el espesor medio (en metros). La constante  $A$  tiene el valor de 28,5 y  $B = 0,357$ .

A modo complementario, se presenta una segunda fórmula basada en los datos obtenidos en los glaciares de la cuenca alta del Río Aconcagua, (Marangunic, C. y Marangunic, P., 2010, actualizada en 2010), en estudios realizados por la industria de la minería en la región. Esta experiencia consistente en más de un centenar de sondajes y estudios geofísicos mediante gravimétrica y sistemas de radar, realizados para determinar el espesor de 13 glaciares de la zona en los últimos años. A partir de lo anterior, se obtiene la siguiente correlación (resulta con ajuste exponencial) entre la superficie de un glaciar y su espesor medio:

$$Y = A * X^B$$

Donde  $X$  es el área del glaciar (en metros cuadrados) e  $Y$  es el espesor medio (en metros). La constante  $A$  tiene el valor de 0,0465 y  $B = 0,51402$ . El coeficiente de correlación que resulta de la ecuación anterior es 0,79.

Se exponen así dos métodos a fin de considerar los trabajos realizados a nivel internacional, junto con un método aplicado al área de estudio y glaciares con áreas de menor superficie.

12. Volumen. El volumen del glaciar se obtiene a partir de la relación entre espesor y área del glaciar.

$$V = \text{área} * \text{espesor}$$

Debido al uso de dos fórmulas para determinar espesores de los glaciares inventariados, se ha calculado el volumen de acuerdo a estas dos fórmulas para determinar espesores.

Se ha incluido una columna llamada NOTA, para diferenciar campos de nieve y glaciaretos, y diferenciar las áreas expuestas y las áreas cubiertas.

La estructura de atributos contenidos en los shape se detalla a continuación (Tabla 3.5.4.1-C).

**Tabla 3.5.4.1-C. Detalle de atributos del inventario de glaciares.**

<b>Atributo</b>	<b>Descripción</b>	<b>Ejemplo</b>
ID	Identificador del polígono del glaciar	601
COD_GLA	Código del glaciar utilizando Chile con la sigla "RC"	CL1M06000022
COD_GLA_RC	Código del glaciar utilizando Chile con la sigla "CL"	RC1M06000022
CLASIFICA	Clasificación primaria glaciar según UNESCO/WGI	5
REGION	Región de Chile expresada en número	6
COMUNA	Comuna de emplazamiento del glaciar	Machalí
FUENTE_DIG	Tipo de imagen o fotografía utilizada	Landsat ETM+
FUENTE_FEC	Fecha de la fuente utilizada	18.03.01
INVENT_FEC	Año en que se inventarió el glaciar	2011
COD_BNA	Código de la sub-subcuenca según el Banco Nacional de Aguas	6000
N_CUENDRE	Número de cuencas de drenaje del glaciar	1
ORIENACUM	Orientación de la zona de acumulación	SE
ORIENABLAC	Orientación de la zona de ablación	SE
ORIENTA	Orientación general del glaciar	SE
HMAX	Cota máxima del glaciar	3304
HMEDIA	Cota media del glaciar	2856
HMINTOTAL	Cota mínima del glaciar	2856
ESP_MED (a)	Espesor medio (en metros) según extensos estudios en la zona central de Chile (Geoestudios, 2010)	24,52
Esp_ChenOhmura (b)	Espesor medio (en metros) utilizado por Chen y Ohmura (1990)	26,90
AREAKM2	Superficie del glaciar en km <sup>2</sup>	0,197
AREAM2	Superficie del glaciar en m <sup>2</sup>	197490
LMAXTOTAL	Largo máximo del glaciar (en km)	0,86

<b>Atributo</b>	<b>Descripción</b>	<b>Ejemplo</b>
ANCHO_PROM	Ancho promedio del glaciar (en km)	0,37
Clasif_UNE	Descripción de la clasificación primaria según UNESCO	Glaciar de Valle
Nombre_Gla	Nombre del glaciar	
NOTA	Indica si es campo de nieve o glaciarete, parte cubierta o descubierta del glaciar, según corresponda	Descubierto
Volumen (a)	Volumen obtenido del espesor (a) expresado en km <sup>3</sup>	0,00484
Volumen ChenyOh (b)	Volumen obtenido del espesor (b) expresado en km <sup>3</sup>	0,00531

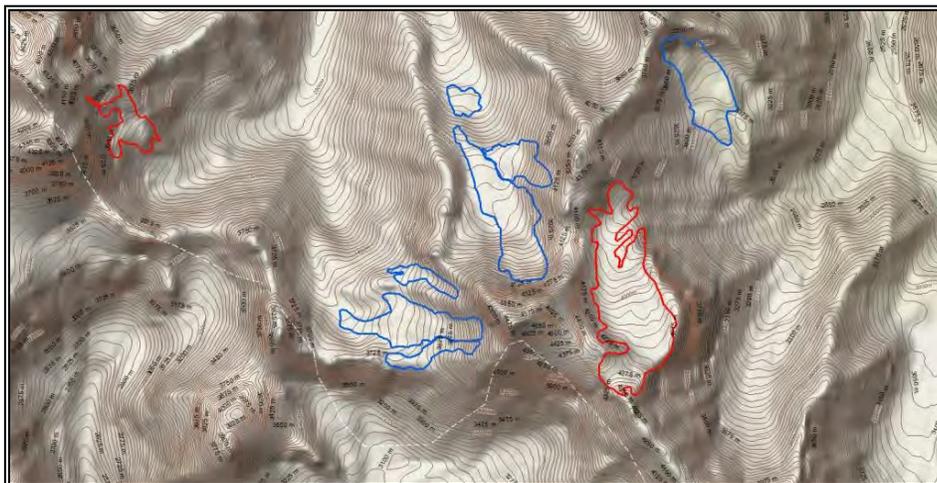
### 3.6. RESULTADOS

#### 3.6.1. Aspectos Generales

A continuación se presentan los resultados del inventario de glaciares a nivel de cuenca y subsubcuenca de las cuencas de los ríos Aconcagua, Maipo, Rapel, Mataquito y Maule. En los anexos A, B, C, D y E se encuentra el detalle de este inventario por cuenca.

También se encuentra el inventario en formato digital, en formato "shp".

En la figura 3.6.1-A se muestra como ejemplo el resultado de los polígonos de los glaciares, con la información topográfica obtenida de los MDE Aster y la información topográfica disponible en la aplicación Arc2Earth. Los polígonos en azul corresponden a los glaciares rocosos y los polígonos en rojo corresponden a los glaciares descubiertos.



**Figura 3.6.1-A. Ejemplo de glaciares descubiertos (delineados en rojo) y rocosos (delineados en azul) identificados en la cuenca del río Maipo.**

### **3.6.2. Cuenca del río Aconcagua**

En la cuenca del río Aconcagua se inventariaron 519 glaciares rocosos, un glaciar de montaña cubierto y 23 rampas de protalus (Tabla 3.6.2-A). La superficie total de glaciares rocosos es de 86.35 km<sup>2</sup> y el volumen es de 2.958 km<sup>3</sup> según la estimación de espesores de Marangunic C. y Marangunic P. (2010). Según la estimación de espesores de Chen y Ohmura (1990) el volumen es de 2.359 km<sup>3</sup>. No se observan diferencias significativas en los valores de volúmenes para el caso de los glaciares de esta cuenca.

La cota máxima promedio de los glaciares rocosos corresponde a 3.949 m.s.n.m. y la cota mínima de los glaciares rocosos corresponde a 3.706 m.s.n.m.

Se observa que la orientación predominante de los glaciares en esta cuenca corresponden a las orientaciones sur (S, SE y SW).

El mayor número de glaciares se encuentra en la subcuenca Aconcagua Alto, específicamente en las sub-subcuencas Río Blanco y Río Colorado antes junta Estero Riecillos. En la subcuenca Aconcagua Bajo no se identificaron glaciares.

**Tabla 3.6.2-A. Inventario de glaciares de la cuenca del río Aconcagua.**

Glaciares	N°	Área Total (km <sup>2</sup> )	Área Promedio (km <sup>2</sup> )	Área Descubierta (km <sup>2</sup> )	Área Cubierta (km <sup>2</sup> )	Espesor medio (a) (m)	Volumen total (b) (km <sup>3</sup> )	Espesor medio (b) (m)	Volumen total (b) (km <sup>3</sup> )	Cota Máxima Promedio	Cota Media Promedio	Cota Mínima Promedio
										(msnm)	(msnm)	(msnm)
Glaciar de Valle	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Glaciar de Montaña	1	0,17	0,17	–	0,17	22,59	0,004	26,74	0,005	4368	3990	3886
Glaciarete	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Glaciar Rocoso	518	86,35	1,49	0	86,35	19,45	2,947	26,22	2,355	3893	3762	3664
<b>TOTAL</b>	<b>519</b>	<b>86,52</b>	<b>1,48</b>	<b>0</b>	<b>86,52</b>	<b>19,46</b>	<b>2,951</b>	<b>26,23</b>	<b>2,359</b>	<b>3894</b>	<b>3762</b>	<b>3665</b>
<b>Otras masas de hielo</b>												
Campo de nieve	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Rampa de Protalus	23	0,87	0,07	–	0,87	–	–	–	–	3755	3673	3624

\*Espesor medio (a) y volumen (a) corresponden a los cálculos realizados en base a mediciones en la cuneca del río Aconcagua. Los espesores y volúmenes (b) corresponden a los cálculos basados en los espesores de Chen y Ohmura (1990).

### **3.6.3. Cuenca del río Maipo**

#### **3.6.3.1. Aspectos generales**

Se han inventariado 718 glaciares en la cuenca del río Maipo. Se han identificado 72 campos de nieve y 161 rampas de protilus. La superficie total de glaciares inventariados es de 387.52 km<sup>2</sup>. En la cuenca del río Maipo (Tabla 3.6.3.1-A) el 5,3% corresponde a glaciares de valle, sin embargo estos representan en superficie un 34% del total de glaciares inventariados.

Los glaciares de montaña representan el 23,21% de glaciares en la cuenca y representan el 28% en superficie. El mayor número de glaciares inventariados en la cuenca corresponde a glaciares rocosos, los cuales corresponden a un 70% del total de glaciares inventariados.

En la tabla 3.6.3.1-A se observan valores de espesores y volúmenes muy disímiles entre la cuenca del río Maipo. Cabe destacar que las fórmulas para definir espesores difieren pues la fórmula de Chen y Ohmura (1990) por un lado corresponde a un cálculo basado principalmente en mediciones de glaciares de grandes superficies, mientras que por otro, la fórmula empleada según sondajes y exploración geofísica en la cordillera de los Andes, específicamente en glaciares de las cuencas del río Aconcagua y Maipo, consideran varios glaciares de lenguas coalescentes, por lo cual los valores de espesor podrían resultar más elevados.

En la subcuenca Maipo Alto el mayor número de glaciares se encuentra en las sub-subcuencas.

**Tabla 3.6.3.1-A. Inventario de glaciares de la cuenca del río Maipo**

Glaciares	Nº	Área Total (km²)	Área Promedio (km²)	Área Descubierta (km²)	Área Cubierta (km²)	Espesor medio (a) (m)	Volumen total (a) (km³)	Espesor medio (b) (m)	Volumen total (b) (km³)	Cota Máxima Promedio	Cota Media Promedio	Cota Mínima Promedio
										(msnm)	(msnm)	(msnm)
Glaciar de Valle	40	125,47	2,48	105,90	19,57	44,52	19,950	28,86	3,88	4676	3964	3487
Glaciar de Montaña	177	103,40	0,59	98,3	6,60	34,54	11,286	27,04	3,64	4684	4355	4110
Glaciarete	13	0,35	0,02	0,35	0,00	7,44	0,004	24,77	0,01	4443	4363	4302
Glaciar Rocoso	538	142,02	0,19	0	142,02	20,55	5,915	26,35	3,652	3733	3577	3462
<b>TOTAL</b>	<b>768</b>	<b>371,24</b>	<b>0,40</b>	<b>204,56</b>	<b>168,18</b>	<b>24,78</b>	<b>37,155</b>	<b>26,61</b>	<b>11,181</b>	<b>4031</b>	<b>3808</b>	<b>3646</b>
<b>Otras masas de hielo</b>												
Campo de nieve	72	5,37	0,06	3,97	1,39	–	–	–	–	4639	4525	4438
Rampa de Protalus	160	10,26	0,07	0,00	10,26	–	–	–	–	3735	3652	3583

\*Espesor medio (a) y volumen (a) corresponden a los cálculos realizados en base a mediciones en la cuneca del río Aconcagua. Los espesores y volúmenes (b) corresponden a los cálculos basados en los espesores de Chen y Ohmura (1990).

### **3.6.4. Cuenca del río Rapel**

#### **3.6.4.1. Aspectos generales**

Respecto a los resultados obtenidos en la cuenca del río Rapel se muestra que se han inventariado 389 glaciares, 258 campos de nieve y 41 rampas de protalus (Tabla 3.6.4.1-A).

Se observa que la mayor superficie está representada por los glaciares de valle, los cuales representan un 47% del total. Los mayores números de glaciares están representados por los glaciares de montaña y glaciares rocosos que representan un 48% y un 38% respectivamente.

Los valores de volumen difieren igual que en la cuenca del río Maipo, y esto se explica por lo mismo que se ha expuesto anteriormente, (ver capítulo 3.6.3.1.). De este modo, se observa que el volumen (a) corresponde a 34,67 km<sup>3</sup> y el volumen (b) corresponde a 8,10 km<sup>3</sup>. Esta diferencia está dada por los glaciares de valle y montaña particularmente. (Tabla 3.6.4.1-A).

El área total inventariada corresponde a 274,47 km<sup>2</sup> y el área cubierta de glaciares corresponde a un 17,7% del total de la superficie total de glaciares inventariados.

La cota máxima promedio para esta cuenca corresponden a 3.761 m.s.n.m. y la cota mínima corresponde a 3.320 m.s.n.m.

**Tabla 3.6.4.1-A. Síntesis de atributos del inventario de glaciares de la Cuenca del río Rapel.**

Glaciares	Nº	Área Total (km²)	Área Promedio (km²)	Área Descubierta (km²)	Área Cubierta (km²)	Espesor medio (a) (m)	Volumen total (b) (km³)	Espesor medio (b) (m)	Volumen total (b) (km³)	Cota Máxima Promedio	Cota Media Promedio	Cota Mínima Promedio
										(msnm)	(msnm)	(msnm)
Glaciar de Valle	43	128.84	3.00	119.17	9.67	76.11	24.65	28.53	3.945	3888	3304	3002
Glaciar de Montaña	190	111.57	0.59	106.37	5.20	34.62	8.65	27.14	3.216	3829	3530	3341
Glaciarete	8	0.12	0.01	0.12	–	6.40	0.0008	24.49	0.0002	3517	3425	3364
Glaciar Rocoso	148	33.94	0.23	–	33.94	22.86	1.38	26.50	0.938	3651	3478	3384
<b>TOTAL</b>	<b>389</b>	<b>274.47</b>	<b>0.71</b>	<b>225.65</b>	<b>48.81</b>	<b>34.15</b>	<b>34.67</b>	<b>27.00</b>	<b>8.10</b>	<b>3761</b>	<b>3483</b>	<b>3320</b>
<b>Otras masas de hielo</b>												
Campo de nieve	258	16.780	0.065	16.780	–	–	–	–	–	3683	3542	3485
Rampa de Protales	41	2.371	0.058	–	2.371	–	–	–	–	3505	3425	3380

\*Espesor medio (a) y volumen (a) corresponden a los cálculos realizados en base a mediciones en la cuenca del río Aconcagua. Los espesores y volúmenes (b) corresponden a los cálculos basados en los espesores de Chen y Ohmura (1990).

### **3.6.5. Cuenca del río Mataquito**

#### **3.6.5.1. Aspectos generales**

En la cuenca del río Mataquito se inventariaron 51 glaciares de los cuales el 70% corresponde a glaciares de montaña (Tabla 3.6.5.1-A). No se identificaron glaciares de valle en el área de estudio y se identificaron 10 glaciares rocosos que corresponde a un 5% del total de glaciares inventariados.

La superficie total de glaciares es de 14,84 km<sup>2</sup>. Los volúmenes corresponden a 0,84 km<sup>3</sup> según la estimación de espesores de Marangunic, C. y Marangunic, P. (2010) y a 0,42 km<sup>3</sup> según las estimaciones de Chen y Ohmura (1990). La diferencia de un 50% entre un total de volumen y otro se explica por lo mencionado anteriormente.

La cota máxima corresponde a 3.308 m.s.n.m. y la cota mínima corresponde a 3.107 m.s.n.m.

Se identificó en esta cuenca la presencia de una rampa de protalus y 15 campos de nieve.

La cuenca de Mataquito es la que posee menor cantidad de glaciares en el área de estudio.

**Tabla 3.6.5.1-A. Inventario de glaciares de la cuenca del río Mataquito.**

Glaciares	Nº	Área Total (km <sup>2</sup> )	Área Promedio (km <sup>2</sup> )	Área Descubierta (km <sup>2</sup> )	Área Cubierta (km <sup>2</sup> )	Espesor medio (a) (m)	Volumen total (a) (km <sup>3</sup> )	Espesor medio (b) (m)	Volumen total (b) (km <sup>3</sup> )	Cota Máxima Promedio	Cota Media Promedio	Cota Mínima Promedio
										(msnm)	(msnm)	(msnm)
Glaciar de Valle	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Glaciar de Montaña	37	13,99	0,41	13,59	0,41	28,60	0,82	26,75	0,40	3352	3229	3116
Glaciarete	4	0,07	0,02	0,07	0,00	6,53	0,00	24,51	0,002	3205	3206	3195
Glaciar Rocoso	10	0,78	0,07	0,78	0,78	13,51	0,01	25,73	0,02	3184	3090	3020
<b>TOTAL</b>	<b>51</b>	<b>14,84</b>	<b>0,31</b>	<b>14,43</b>	<b>1,18</b>	<b>23,91</b>	<b>0,84</b>	<b>26,37</b>	<b>0,42</b>	<b>3308</b>	<b>3200</b>	<b>3103</b>
<b>Otras masas de hielo</b>												
Campo de nieve	15	1,12	0,08	1,12	0,11	11,21	0,00	25,46	0,00	3120	3075	3019
Rampa de Protalus	1	0	0	-	0	-	-	-	-	3000	2960	2880

\*Espesor medio (a) y volumen (a) corresponden a los cálculos realizados en base a mediciones en la cuenca del río Aconcagua. Los espesores y volúmenes (b) corresponden a los cálculos basados en los espesores de Chen y Ohmura (1990).

### **3.6.6. Cuenca del río Maule**

#### **3.6.6.1. Aspectos generales**

El inventario realizado en la cuenca del río Maule (Tabla 3.6.6.1-A), presenta 63 glaciares, de los cuales el mayor porcentaje está representado por los glaciares de montaña.

Se identificaron 85 campos de nieve y no se observan rampas de protalus en esta cuenca. La cota máxima promedio corresponde a 3.105 m.s.n.m. y la cota mínima corresponde a 2.814 m.s.n.m.

La superficie total de glaciares es de 22,51 km<sup>2</sup>. Los volúmenes totales según la estimación de Marangunic, C. y Marangunic, P. (2010) no difieren significativamente de las estimaciones calculadas con la fórmula de Chen y Ohmura (1990). El primer dato de volumen total corresponde a 0,954 km<sup>3</sup> y el segundo corresponde a 0,630 km<sup>3</sup>. Se puede explicar mayor similitud, la cual no se ha identificado en otras cuencas, porque en esta cuenca no existen glaciares de valle. Los valores de espesores sólo consideran glaciares de montaña y glaciares rocosos y presentan valores promedios cercanos a los 30 m aproximadamente, utilizando ambas fórmulas de estimación de espesor.

**Tabla 3.6.6.1-A. Inventario de glaciares de la cuenca del río Maule**

Glaciares	Nº	Área Total (km <sup>2</sup> )	Área Promedio (km <sup>2</sup> )	Área Descubierta (km <sup>2</sup> )	Área Cubierta (km <sup>2</sup> )	Espesor medio (a) (m)	Volumen total (a) (km <sup>3</sup> )	Espesor medio (b) (m)	Volumen total (b) (km <sup>3</sup> )	Cota Máxima Promedio	Cota Media Promedio	Cota Mínima Promedio
										(msnm)	(msnm)	(msnm)
Glaciar de Valle	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Glaciar de Montaña	50	19,00	0,61	18,26	0,74	33,47	0,828	27,26	0,53	3140	2982	2839
Glaciarete	2	0,01	0,01	0,01	0,00	5,50	0,0001	24,25	0,0003	3544	3536	3506
Glaciar Rocoso	14	3,50	0,22	0,00	3,50	24,46	0,126	26,64	0,10	2928	2719	2631
<b>TOTAL</b>	<b>66</b>	<b>22,51</b>	<b>0,51</b>	<b>18,27</b>	<b>4,24</b>	<b>30,58</b>	<b>0,954</b>	<b>27,02</b>	<b>0,630</b>	<b>3105</b>	<b>2941</b>	<b>2814</b>
<b>Otras masas de hielo</b>												
Campo de nieve	87	4,95	0,07	4,87	0,08	–	–	–	–	2901	2831	2775
Rampa de Protalus	0	0	0	0	0	–	–	–	–	0	0	0

\*Espesor medio (a) y volumen (a) corresponden a los cálculos realizados en base a mediciones en la cuenca del río Aconcagua. Los espesores y volúmenes (b) corresponden a los cálculos basados en los espesores de Chen y Ohmura (1990).

## **4. MONITOREO DEL GLACIAR UNIVERSIDAD Y PROPUESTA DE RED GLACIOLÓGICA**

### **4.1. ASPECTOS GENERALES**

Se realizaron estudios en el glaciar Universidad desde mediados de Diciembre de 2010 hasta fines de Marzo de 2011. Se realizaron visitas específicas previas a esa fecha y se concluyó la campaña, a principios de Abril de 2011. Durante la campaña de terreno se instalaron y luego controlaron en dos oportunidades 17 balizas de ablación en el glaciar. Se realizaron mediciones de densidad de la neviza en pozos de nieve, se instaló y mantuvo una estación meteorológica automática proporcionada por la DGA, y se intentó, infructuosamente (por causas ajenas a Geoestudios) realizar aforos en una estación fluviométrica instalada previamente por la DGA, ya que esta se encontró vastamente deteriorada.

Los estudios realizados en el glaciar Universidad muestran que entre mediados de Diciembre de 2010 y finales de Marzo de 2011 la masa perdida por el glaciar en un período de aproximadamente 98 días, es de  $-4,04E+13$  g. Esta masa representa un aporte hídrico como caudal medio constante en el período, de  $4,77$  m<sup>3</sup>/s.

Como resumen, el balance anual de masas de la superficie del Glaciar Universidad para el período que va desde el fin del verano 2010 a fin del verano de 2011 es como sigue:

Masa ganada en sectores altos del glaciar..... $3,50E+12$  g.

Masa perdida en el resto de los sectores del glaciar..... $-5,03E+13$  g.

**BALANCE** ..... **$-4,68E+13$  g.**

Así, y de manera muy general, puede decirse que el glaciar, de  $27,5$  km<sup>2</sup> de extensión, perdió en el año que analizamos un promedio de  $-169,98$ g/cm<sup>2</sup> de su superficie.

También se puede señalar que el balance negativo de masa del glaciar significa un aporte hídrico al Río San Andrés del orden de  $1,24$  m<sup>3</sup>/s como promedio anual, y más bien del orden de  $1,86$  m<sup>3</sup>/s como promedio distribuido entre los meses de Octubre a Mayo.

No fue posible realizar el balance hídrico por falta de antecedentes en la principal variable de este balance, la esorrentía, debido a serios daños encontrados en la estación fluviométrica de la DGA. Estimaciones de los otros términos del balance hídrico, tales como la evaporación, la precipitación líquida y el congelamiento de agua en el glaciar, señalan que ellos son muy poco significativos (del orden de pocos litros por segundo) en comparación con el orden de magnitud (de metros cúbicos por segundo) que debiera tener la esorrentía.

El balance energía no fue posible de realizar, por falta de registros meteorológicos asociados a los parámetros de radiación onda corta incidente y reflejada, y radiación onda larga incidente y emitida. En el sensor de radiación solar se registraron, datos insuficientes e inconsistentes para realizar los cálculos de esta variable, que son necesarios para medir la relación física entre los procesos de ablación en la nieve o hielo y las condiciones meteorológicas.

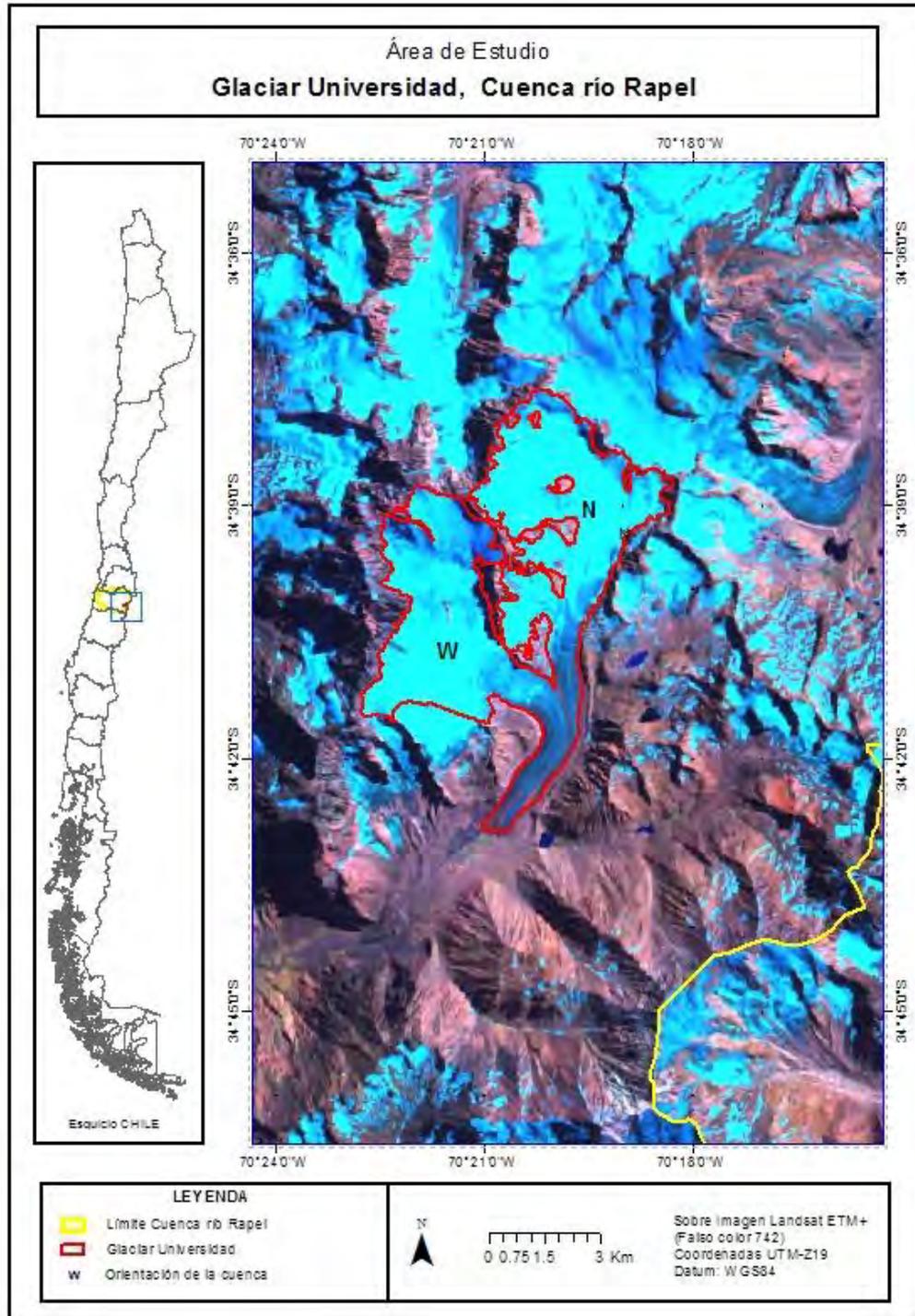
Como parte de las obligaciones del estudio, se identifican glaciares que se recomiendan como pilotos para las cuencas de los ríos Aconcagua, Maipo, Rapel y Maule, y se recomiendan ubicaciones de eventuales estaciones de aforo cercanas a estos glaciares.

#### **4.2. UBICACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL GLACIAR UNIVERSIDAD**

El glaciar Universidad se ubica en la sub-cuenca del Río Cachapoal, de la cuenca del Río Rapel, en la Región VI del Libertador Bernardo O´Higgins (Figura 4.2-A).

El glaciar Universidad tiene 27,5 km<sup>2</sup> de extensión, corresponde a un glaciar de tipo templado, dispuesto entre las cotas máximas y mínimas de 4.580 m y 2.446 m en la laguna proglacial que existe en el frente del glaciar. Está ubicado en la alta cordillera de la VI Región, en la comuna de San Fernando.

El glaciar Universidad se forma a partir de dos lenguas coalescentes provenientes de una cuenca norte y de otra cuenca oeste (Figura 4.2-A). También existen otras pequeñas cuencas que se pueden observar en la cuenca norte. Sin embargo, para efecto de este estudio, estas cuencas se han considerado como parte de la cuenca norte del glaciar.



**Figura 4.2-A. Ubicación del glaciar Universidad en la sub-cuenca del Río Cachapoal.**

En la tabla 4.2-A se presenta la información referente al glaciar Universidad, la cual forma parte del "Inventario de glaciares de las cuencas de los ríos Aconcagua, Maipo, Rapel, Mataquito y Maule" contenida en el volumen 1 de este estudio.

**Tabla. 4.2-A. Ficha descriptiva del glaciar Universidad, los datos corresponden al inventario de glaciares.**

<b>Campo</b>	<b>Descripción</b>	<b>Atributo</b>
COD_GLA	Código del glaciar	RC1M06023011
NOMBRE	Nombre del Glaciar	Universidad
CLASIFICA	Primer dígito de clasificación de acuerdo a normas UNESCO/WGI	5
Clasif_UNESCO	Tipo de glaciar según clasificación primaria UNESCO (primer dígito de clasificación)	Glaciar de Valle
REGION	Región	6
COMUNA	Comuna	San Fernando
DATUM	Sistema de referencia utilizado	WGS84
HUSO	Zona cartográfica	19 Sur
ESTE	Coordenada Este UTM del centroide del glaciar	376886
NORTE	Coordenada Norte UTM del centroide del glaciar	6163221
LATITUD	Coordenada geográfica	34° 39' 56.098" S
LONGITUD	Coordenada geográfica	70° 20' 37.281" W
FUENTE_DIG	Fuente utilizada	Landsat ETM+
FUENTE_FECHA	Fecha de la fuente	18.03.01
INVENT_FECHA	Año de inventario	2011
COD_BNA	Código del Banco Nacional de Agua	6023
N_CUENDRE	Número de cuencas de drenaje que posee el glaciar	1
AREAKM2	Superficie en km <sup>2</sup>	27,57
AREAM2	Superficie en m <sup>2</sup>	27565332
AREA_EXP	Área expuesta del glaciar en km <sup>2</sup>	27.,57
AREA_CUB	Área cubierta del glaciar	0
ORIENACUM	Orientación del área de acumulación	SSE
ORIENABLAC	Orientación del área de ablación	S
ORIENTA	Orientación principal del glaciar	SSW
HMAX	Altura máxima del glaciar en msnm	4460
HMEDIA	Altura media del glaciar en msnm	3376
HMINTOTAL	Altura mínima del glaciar en msnm	2465
ESP_MED (a)	Espesor medio en m, estimado según fórmula utilizada en sondajes y mediciones en glaciares en Chile	310,42
Esp_ChenOhmura (b)	Espesor medio en m según Chen y Ohmura (1990)	32,08
LMAXTOTAL	Largo máximo del glaciar en m	8,76
ANCHO_PROM	Ancho promedio del glaciar en m	1,9
NOTA	Nota respecto a si el glaciar presenta zona cubierta	Descubierto

Las principales limitaciones encontradas para la realización del presente estudio son, y como se describe más adelante en detalle, las siguientes:

- La estación fluviométrica que debía encontrarse aguas abajo del glaciar Universidad con el fin de realizar los aforos, no existía. En el sitio sólo quedaban restos de ella, algunos elementos de acero sobresaliendo del agua y de una caseta (que probablemente guardaba en alguna oportunidad algún instrumento o registrador). Es posible que el medidor de presión de la estación esté sumergido, no se puede asegurar que quede algo de la infraestructura de la estación.
- Se instaló, previa revisión en Santiago, y se mantuvo en el glaciar Universidad la estación meteorológica automática portátil, que entregó la Unidad de Glaciares y Nieve de la Dirección General de Aguas. Sin embargo varios sensores de ella no funcionaron correctamente, algunos de ellos claves para realizar el balance calórico, como el sensor de radiación incidente en onda corta. Durante las reiteradas pruebas realizadas previamente a la instalación en el glaciar, los sensores funcionaron, en cambio instaladas sobre el glaciar indicaban datos inválidos.
- Debido a que el invierno de 2010 fue uno de relativamente bajas precipitaciones en la zona del centro de Chile (del orden de un 70% de la precipitación de un año normal, según estadística de la Oficina Meteorológica de Chile), la relativamente menor acumulación de nieve en la Zona de Alimentación del glaciar Universidad dejó expuesto, abierto en la superficie, el intrincado campo de grietas que en ella existe, lo cual dificultó el desplazamiento del personal en el glaciar y, por motivos de seguridad, obligó a marginar ciertos sectores de los reconocimientos y exploraciones.

### **4.3. ASPECTOS GENERALES DEL GLACIAR**

#### **4.3.1. Preparación de las campañas a terreno**

Como preparación de la 1ª campaña de trabajo en terreno al glaciar Universidad, se realizó lo siguiente:

- Mantenimiento del taladro saca testigo para hielo manual.

- Mantenimiento del taladro saca testigo para hielo mecánico.
- Mantenimiento del muestreador de nieve Monte Rosa.
- Revisión de las sondas para profundidad de nieve.
- Revisión del equipo para estratigrafía y densidad de nieve en pozo.
- Mantenimiento de la Ramsonda.
- Revisión de los elementos de seguridad para alta montaña (cuerdas, clavos de hielo y roca, crampones, mosquetones, piolets, arneses, jumar, bastones de marcha, y otros).
- Revisión y mantención los Beepers para rescate en avalanchas.
- Comprobación del funcionamiento del teléfono satelital, que se utiliza como herramienta de seguridad.
- Revisión de los materiales de campamento (carpa, cocinilla, lámparas, sacos de dormir, colchones, toldos, etc.)
- Recolección de materiales y elementos que se utilizaran para la demarcación de puntos en el glaciar (coligues, pintura, cintas de visualización).
- Revisión con personal de la DGA respecto de la situación de la estación meteorológica automática que deberá instalarse en el glaciar Universidad.

Se comenzó con los trabajos preparativos los últimos días de Noviembre de 2010, apenas se recogió la estación meteorología y previa cita en las oficinas de la DGA, se informa de los avances y metodología de estudio. En las semanas previas se prepararon los equipos, instrumentos y materiales. Se analizó la ubicación del campamento con los datos obtenidos en la visita previa al glaciar Universidad.

Se realizaron los cursos de inducción para ingresar y conducir hacia el área de trabajo con los responsables de seguridad de cada una de las empresas que se encuentran realizando trabajos en la zona.

En la primera semana de Diciembre la estación meteorológica fue montada en las dependencias de Geoestudios para su prueba y ensayo junto al técnico de la empresa proveedora. Se determinó en esa ocasión la adaptación que se haría a la base del mástil para la instalación sobre el hielo. En esta instancia no se identifica una diferencia en las conexiones de los cables que van al radiómetro. Los valores que entrega el radiómetro en condiciones de entorno normales, vegetación, suelo, cielo, parecen normales para el técnico. Al instalar la estación en el glaciar se constató la diferencia en los cables del

radiómetro junto a la falta de distintivos que indicaran su correspondencia. En las condiciones de luz encontradas en el lugar de emplazamiento sobre el glaciar, los datos aparecen como "inválidos". Se lleva el logger al servicio técnico para la revisión del buen funcionamiento del radiómetro y la clara correspondencia de sus cables conectores. El servicio técnico entrega el equipo revisado y con los cables identificados. Se reinstala de acuerdo a las instrucciones el técnico.

#### **4.3.2. Las campañas al glaciar Universidad**

Durante la temporada veraniega se realizaron 3 campañas de terreno, en las que se movilizó al glaciar Universidad todo el equipo de campamento y de trabajo necesario para llevar a cabo las actividades programadas, de acuerdo a los requerimientos del estudio.

En el mes de Abril se realizó una cuarta y última campaña, extraordinaria, para retirar del glaciar la estación meteorológica automática, esta se mantuvo por el periodo comprendido entre la tercera campaña y el día que se retiró del glaciar a petición del personal de la Unidad de Nieve y Glaciares de la DGA.

A continuación se muestran las fechas en las que se llevaron a cabo las campañas.

- a) La primera campaña se realizó entre el día 7 y 23 de Diciembre de 2010.
- b) La segunda entre el 27 de Enero y el 5 de Febrero de 2011.
- c) La tercera entre el 20 y 27 de Marzo de 2011.
- d) Entre los días 15 y 16 de Abril se realizó una campaña para desmontar y retirar la estación meteorológica.

En el lapso de tiempo entre cada campaña se realizaron algunas visitas al glaciar por periodos cortos de tiempo, de solamente uno o dos días, con el fin de comprobar el estado de la estación meteorológica automática y efectuar los ajustes que fueran necesarios. En general, para asegurar el estado de la estación meteorológica automática fue necesario acceder al lugar donde se encontraba instalada cada dos a tres semanas durante toda la temporada, mientras se mantuvo sobre el hielo.

##### **4.3.2.1. La primera campaña de terreno**

El día martes 7 de Diciembre de 2010 se dio inicio a la 1ª campaña a terreno al glaciar Universidad. Todo el material fue transportado hasta el punto de partida de los senderos de montaña en las camionetas 4x4. Este fue el punto de encuentro con los arrieros y mulares contratados para la continuación del transporte de equipos al campamento base.

En este punto el equipo fue cuidadosamente cargado sobre los mulares y transportado bajo la dirección de los arrieros.

Una vez descargados los equipos se inició la instalación del campamento base. Se seleccionó un sitio protegido del clima y con buen abastecimiento de agua sin sedimentos. Este lugar se encuentra cercano del frente del glaciar, lo que facilitó los accesos para las diferentes operaciones que, descritas en orden cronológico, fueron las siguientes:

- a) Instalación de la estación meteorológica automática en su ubicación definitiva.
- b) Instalación de un campamento avanzado sobre el glaciar, en un punto cercano a la estación meteorológica.
- c) Instalación de la red de 17 estacas en el hielo del glaciar para medir ablación.
- d) Excavación de pozos estratigráficos para la estimación de densidad en la neviza en las cuencas Norte y Oeste.
- e) Aforo del caudal en la estación fluviométrica.

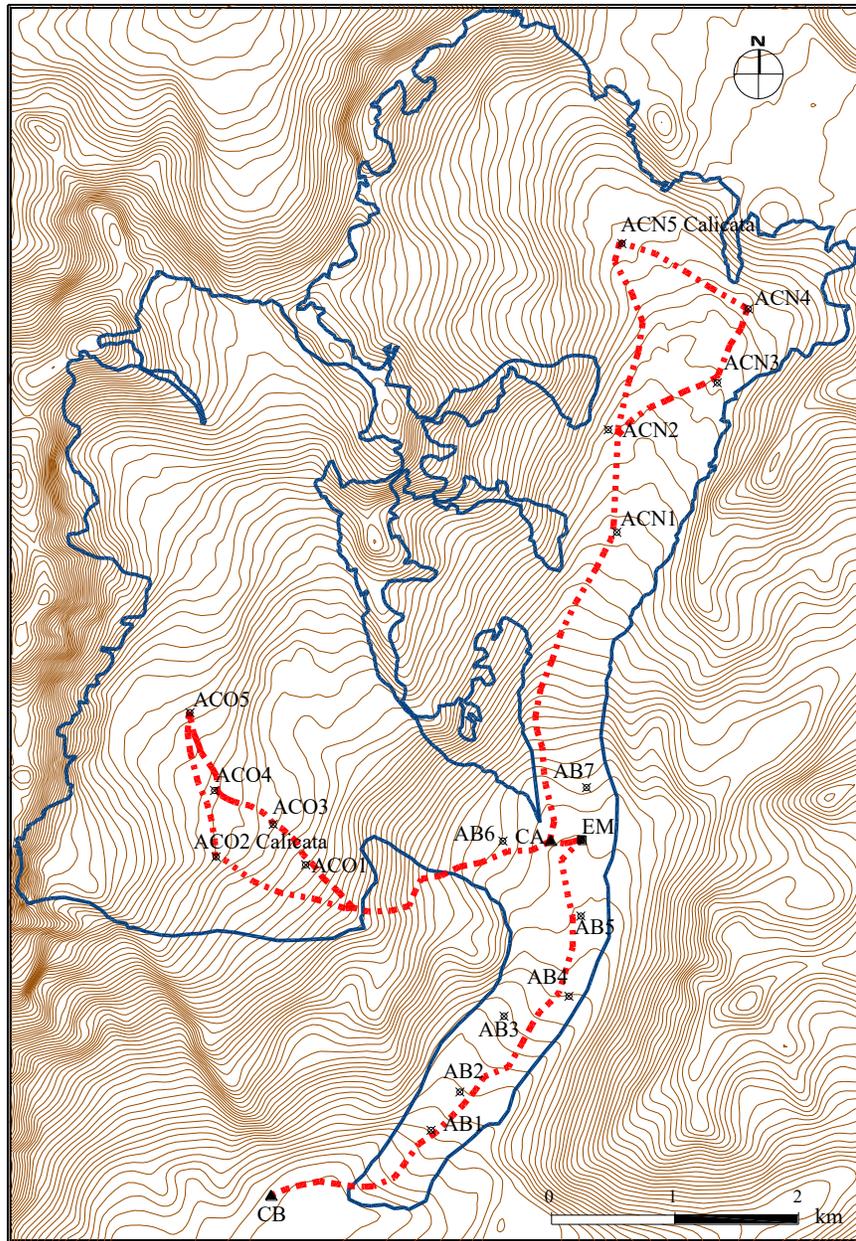
El día 23 de Diciembre se desarmó y retiró el campamento base, dando por concluida la primera campaña.

#### **4.3.3. Las campañas siguientes**

Las campañas siguientes se desarrollaron de manera similar, siempre con el apoyo de mulares para transportar el material necesario hacia y desde el glaciar. El campamento base se instaló en el mismo lugar seleccionado durante la primera campaña, el campamento avanzado se instaló también, sobre el glaciar en un lugar cercano al de ubicación de la estación meteorológica. Las actividades programadas para estas campañas se desarrollaron desplazándose a pie desde estos dos campamentos. Como se indica en otros capítulos durante la segunda campaña fue necesario reponer la mayoría de las balizas para el control de ablación, para esto fue necesario trasladarse con el taladro durante todo el tiempo que se extendió esta campaña. Lo mismo se debió hacer en el caso de la (AWS) que requirió de atención permanente.

En la figura 4.3.3-A se muestra la ubicación de los campamentos y las rutas más utilizadas para desplazarse entre estos y hacia las dos cuencas superiores. Las siglas corresponden a:

- **CB**, Campamento base.
- **CA**, Campamento avanzado.
- **EM**, Estación meteorológica.
- **ACO 2 Calicata**, lugar de ubicación de baliza ACO 2 y punto donde se realizaron las calicatas en la cuenca Oeste.
- **ACN 5 Calicata**, lugar de ubicación de baliza ACN 5 y punto donde se realizaron las calicatas en la cuenca Norte.



**Figura 4.3.3-A. Plano de ubicación de campamentos, balizas de ablación, estación meteorológica, pozos de densidades y rutas de tránsito sobre el glaciar.**

## **4.4. EL BALANCE DE MASAS DEL GLACIAR**

### **4.4.1. Instalación y control de la red de balizas de ablación**

#### **4.4.1.1. La red de balizas**

El programa de trabajo durante el verano, en el glaciar Universidad, comprendió las actividades que se deben desarrollar en la instalación y control de una red de balizas.

Se diseñó una malla de 17 balizas para mediciones de ablación, distribuida en la zona de acumulación, línea de equilibrio y zona de ablación del glaciar. La distribución y emplazamiento de cada baliza se decidió en función de variables como probables líneas de flujo, las cotas y las posibilidades de acceso de las diferentes cuencas y sub-cuencas del glaciar. Una de las balizas se instaló a pocos metros de la estación meteorológica, con el fin de comparar resultados de la medición de ablación con aquellos de la estación; esta fue la baliza AB-7.

La distribución de los puntos de control se realizó de tal manera que intentara representar las condiciones de ablación en todo el glaciar, sin embargo, dificultades de acceso y tránsito en los sectores altos del glaciar, en lo que es su zona de acumulación, no permitieron contar en esos sectores con un mayor número de estacas, como hubiera sido deseable. Así, se instalaron las estacas, o balizas, tanto en la zona de acumulación como de ablación del glaciar (pero menor cantidad en la primera) (Figura 4.4.1.1-A).

En la decisión de ubicación de las balizas se tuvo presente que los montos de acumulación de nieve, y de ablación de nieve o hielo, dependen, de manera importante, de la cota, por lo que es conveniente que la disposición de las estacas representen de mejor manera las variaciones de cota que las variaciones horizontales. También se consideró la superficie del glaciar con presencia de numerosas y profundas grietas, campos de seracs, condiciones que modifican las decisiones respecto a la posición de un punto.

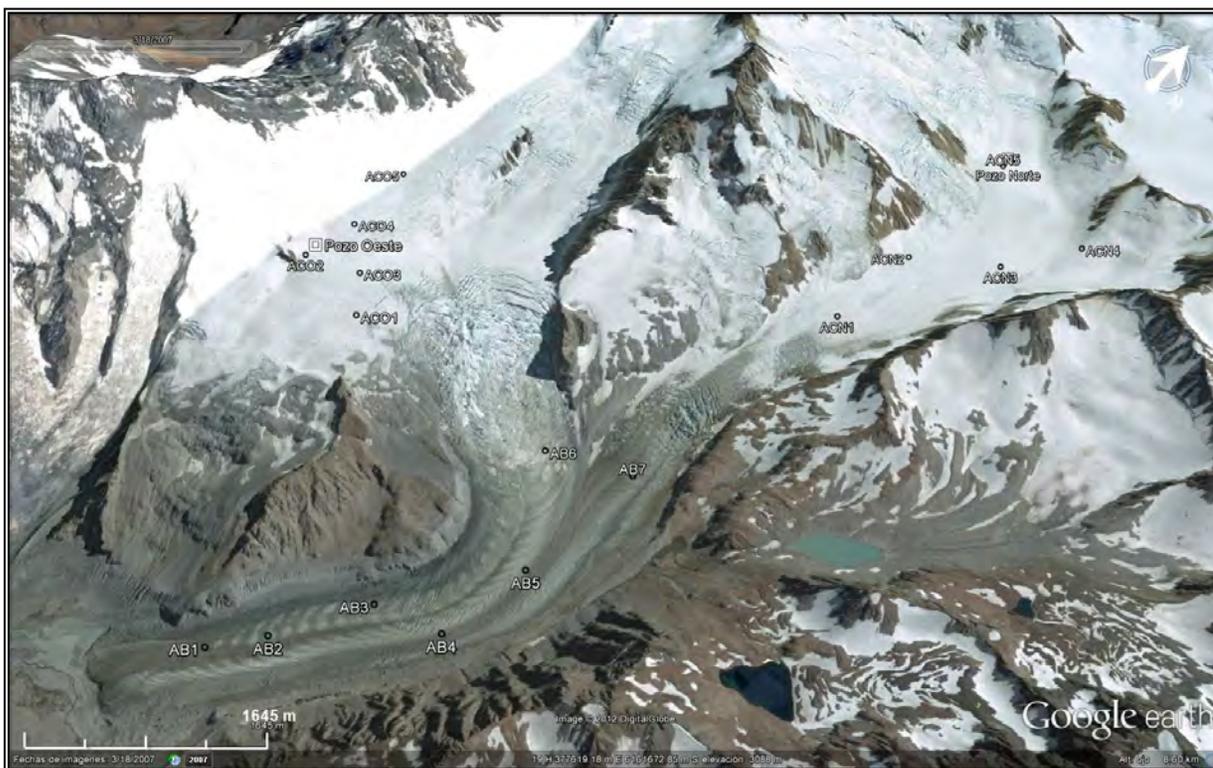
La instalación de las balizas de ablación se inició el día 16 de Diciembre de 2010, y estas se mantuvieron hasta el término del último control, el día 23 de Marzo de 2011. De modo que se controló la variación de la superficie del glaciar al momento de la instalación de balizas y luego en el primer y segundo control.

Así, la red de balizas finalmente instalada se muestra en la figura 4.4.1.1-A y en la figura

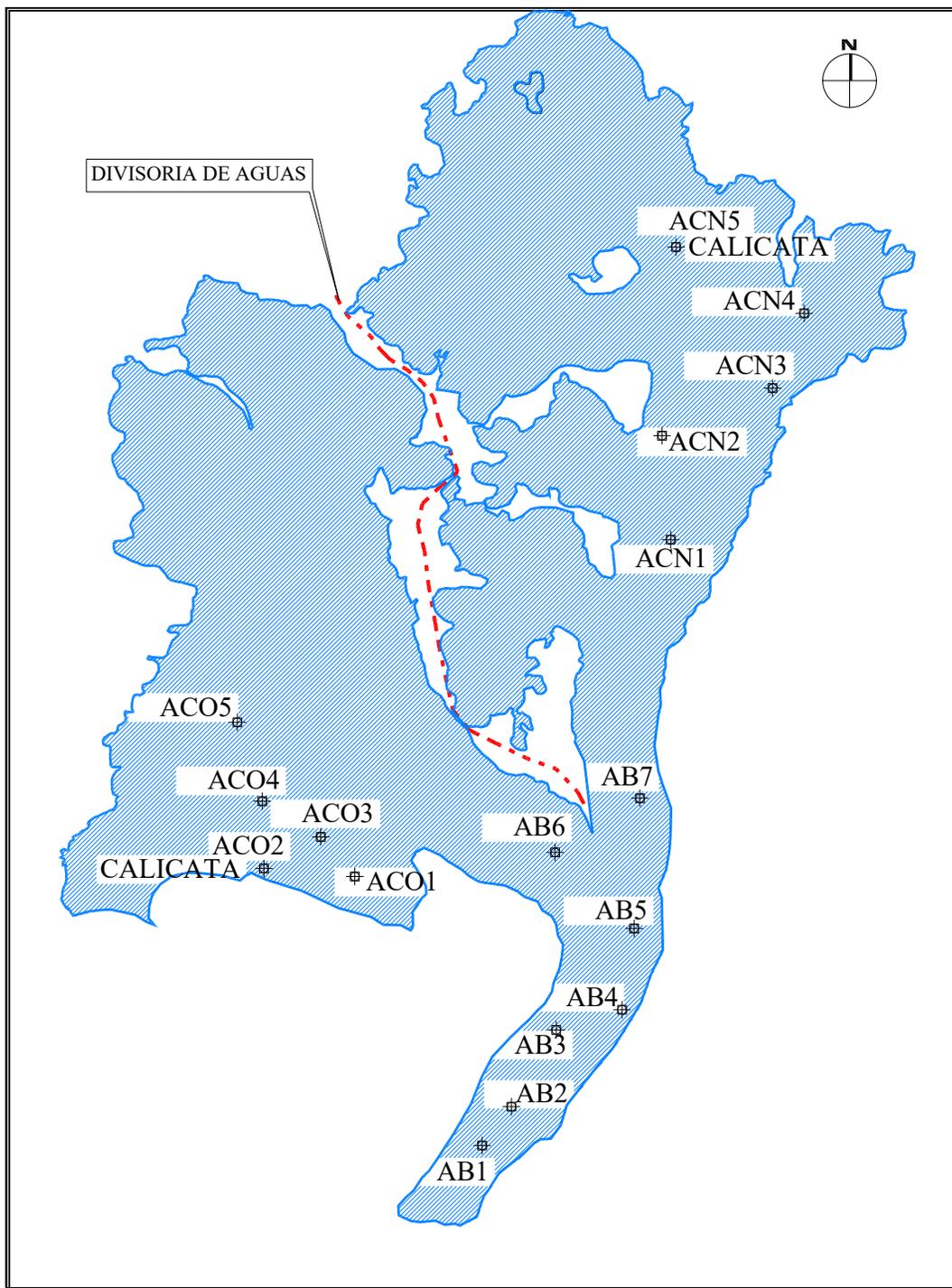
4.4.1.1-B se muestra la ubicación de las balizas en el glaciar Universidad.

Se muestran dos series de siglas. Una corresponde a las balizas instaladas para el control de ablación, estas se nominaron de acuerdo a su ubicación en las distintas áreas sobre el glaciar, las de la zona más baja con las letras AB seguido de un numero relacionadas a la supuesta zona de ablación, las de la zona alta con tres letras seguidas de un numero, ACN ó ACO, por la supuesta zona de acumulación y subcuenca, Norte y Oeste. La otra serie corresponde a la identificación de cada zona definida en base a las características observadas en terreno, para asignarle las tazas de ablación determinadas en las balizas instaladas, cada una comprendida por el área pintada de un color determinado. Las siglas de dos o tres letras, de las cuales la primera es una S por sector, la segunda es única para cada sector y la tercera indica la cuenca Norte u Oeste donde se encuentra cada sector.

Las coordenadas de cada punto se muestran en la tabla 4.4.1.1-A.



**Figura 4.4.1.1-A. Distribución de balizas para el control de la ablación en el glaciar Universidad.**



**Figura 4.4.1.1-B. Ubicación de balizas para el control de la ablación en el glaciar Universidad.**

**Tabla 4.4.1.1-A. Fecha de instalación y coordenadas UTM de balizas.**

Baliza	Instalación			Cota	Coordenadas UTM		
	Fecha	Hora	Aspecto		Sur	Este	
ACN1	13-12-2010	14:40	Suroeste	3317	6163272	378492	Cuenca Norte
ACN2	16-12-2010	18:10	Norte	3393	6164102	378423	
ACN3	13-12-2010	16:40	Sur	3446	6164482	379305	
ACN4	13-12-2010	17:15	Sur	3530	6165079	379557	
ACN5	16-12-2010	16:13	Sureste	3583	6165608	378534	
ACO1	18-12-2010	13:55	Sureste	3515	6160582	375973	Cuenca Oeste
ACO2	18-12-2010	18:08	Este	3657	6160646	375248	
ACO3	18-12-2010	15:50	Sureste	3614	6160898	375702	
ACO4	18-12-2010	17:05	Sureste	3701	6161183	375235	
ACO5	18-12-2010	16:40	Sureste	3764	6161813	375036	
AB1	19-12-2010	16:07	Suroeste	2521	6158434	376988	Zona Ablación
AB2	17-12-2010	12:35	Sur	2623	6158744	377222	
AB3	17-12-2010	13:55	Oeste	2686	6159357	377579	
AB4	17-12-2010	15:50	Sur	2741	6159518	378104	
AB5	17-12-2010	17:21	Sur	2781	6160167	378201	
AB6	10-12-2010	14:00	Sur	2904	6160774	377570	
AB7	17-12-2010	19:30	Sur	2894	6161207	378247	

#### 4.4.1.2. Los materiales de las balizas y colocación de estas

Debido la extensión del glaciar, y la distancia que se debe recorrer para cubrir el área donde se instalaron las balizas para el control de ablación, se determinó utilizar como **balizas, una tubería de PVC flexible de ½" de diámetro, del tipo utilizado comúnmente** para el armado de redes eléctricas en edificios, sus características hacen que este material sea fácil de transportar, se pueda dimensionar de acuerdo a la profundidad de la perforación que se efectúe en el hielo, y es altamente visible debido a su color anaranjado. Adicionalmente, el tubo de PVC es pobre transmisor de calor de manera que la alteración del pozo en que se inserta es mínima.

Para efectuar las perforaciones se empleó un taladro mecánico para hielo, el que consiste en una broca de 3 cm de diámetro y 1 m de largo, con extensiones de 1 m cada una que se adaptan a la broca para profundizar la perforación, accionado manualmente con una manivela tipo taladro manual, y por un motor portátil de dos tiempos. En las figuras 4.4.1.2-A a 4.4.1.2-D se muestra el equipo de perforación, el material utilizado y la apariencia final después de la instalación de las balizas de ablación.



**Figura 4.4.1.2-A. Taladro de perforación en hielo y baliza flexible de PVC.**



**Figura 4.4.1.2-B. Insertando una baliza en el sondaje previamente realizado.**



**Figura 4.4.1.2-C. Apariencia de una baliza flexible de PVC, instalada en el hielo.**



**Figura 4.4.1.2-D. Baliza flexible de PVC, con marcas de identificación y nivel de la superficie del hielo. Corresponde a la baliza AB-2.**

El procedimiento para la instalación de balizas se desarrolla de acuerdo al siguiente patrón.

- Ubicación y determinación del lugar exacto para la perforación.
- Perforación utilizando el equipo descrito más arriba, adaptando extensiones hasta alcanzar la profundidad deseada (4 m aproximadamente en la primera instalación).
- Comprobación de la profundidad de la perforación, medición y corte de la tubería

de PVC.

- Instalación de la tubería en la perforación, instalación de la marca de identificación.
- Control y registro de los antecedentes, consistente en identificación, largo total de la tubería, extensión fuera del hielo, fecha y hora del control.

#### **4.4.1.3. La instalación y el sistema de medición**

La instalación de la red de balizas se inició el día 8 de Diciembre del 2010 como parte de las actividades correspondientes a la primera campaña de terreno, y en forma paralela a lo que fue la instalación de la estación meteorológica.

Esta actividad fue realizada por un grupo de tres personas, quienes debieron permanecer varios días en el glaciar para llevar a cabo esta actividad, debido principalmente a la gran demanda de recursos y alta complejidad que reviste el desplazamiento por un glaciar de las características que se encuentran en el Universidad.

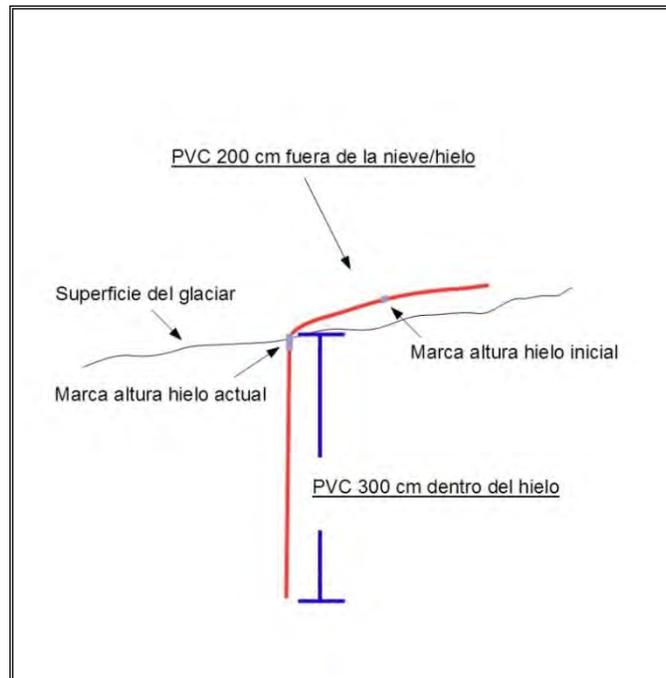
Para la instalación de las balizas en la parte alta del glaciar, (cuencas Norte y Oeste), se implementó un campamento avanzado, cercano al lugar de emplazamiento de la estación meteorológica automática, el que fue utilizado como base de operaciones durante el tiempo que tomó la instalación y control de estas balizas.

Las condiciones del glaciar finalmente llevaron al grupo a acomodar la ubicación de las balizas en la parte alta de las cuencas de acuerdo a las dificultades que encontraron para desplazarse sobre el hielo, entre las grietas y la distribución de balizas propuesta originalmente.

El registro o medición misma de las balizas se realizó como sigue (Figura 4.4.1.3-A):

- a) Luego de introducir el PVC hasta la profundidad deseada (4 m en este caso), se marca en el PVC la altura de la superficie del hielo.
- b) Para marcar se utiliza Duck Tape reforzado y plumón permanente.
- c) Se toma nota de la medida del tubo que ha quedado al exterior y la fecha de medición.

d) Durante la siguiente medición se volverá a medir la porción de PVC que esta fuera del hielo, dando esto una diferencia de medidas que corresponderá a la ablación del periodo de días entre una y otra medición



**Figura 4.4.1.3-A. Baliza de PVC de 5 m de largo, después de un periodo de tiempo, lapso en el cual ha disminuido en 1 m el espesor de hielo o nieve, por lo que el tramo de PVC sobresaliente de la superficie ha aumentado a 2 m.**

En las figuras 4.4.1.3-B a 4.4.1.3-E se ilustra lo que fue el proceso de distribución e instalación de la red de balizas de ablación.



**Figura 4.4.1.3-B. Trabajos de perforación del hielo con taladro mecánico en la cuenca Norte del glaciar Universidad.**



**Figura 4.4.1.3-C. Baliza de ablación instalada en la cuenca Norte del glaciar Universidad.**



**Figura 4.4.1.3-D. Ascenso hacia la zona alta de la cuenca Oeste del glaciar Universidad.**



**Figura 4.4.1.3-E. Baliza de ablación instalada en la zona alta de la cuenca Oeste del glaciar Universidad.**

Durante la segunda campaña fue necesario reinstalar la totalidad de las balizas, para esto se debió implementar nuevamente el campamento avanzado ubicado en las cercanías de la estación meteorológica automática, y movilizar todo el equipo y recursos necesarios

para llevar a cabo esta labor, de la misma manera que fue realizado durante la primera campaña. En esta ocasión el desplazamiento sobre el glaciar fue más dificultoso que durante la primera campaña, debido fundamentalmente al efecto de la ablación y agrietamiento sufrido por el glaciar con el avance de la temporada veraniega. En las figuras 4.4.1.3-F a 4.4.1.3-H se muestra parte de lo que fue el desarrollo de la segunda campaña.



**Figura 4.4.1.3-F. Reinstalación de una baliza de ablación en la zona baja del glaciar Universidad.**



**Figura 4.4.1.3-G. Ascenso hacia la zona de acumulación de la cuenca Oeste del glaciar Universidad.**



**Figura 4.4.1.3-H. Baliza de ablación encontrada dentro de una grieta en la zona de acumulación de la cuenca Oeste del glaciar Universidad.**

La tercera campaña fue compleja debido a las condiciones de la superficie del glaciar, el aumento en la cantidad y tamaño de las grietas hicieron más lento el desplazamiento del grupo a través del hielo que en las ocasiones anteriores, obligándolos a tomar todas las medidas de seguridad posibles para evitar cualquier tipo de accidentes. En las figuras

4.4.1.3-I y 4.4.1.3-J, se muestran las condiciones del terreno.



**Figura 4.4.1.3-I. Perforación manual con taladro para la reinstalación de baliza en cuenca Oeste del glaciar Universidad.**



**Figura 4.4.1.3-J. Desplazamiento a través de un campo de grietas durante la tercera campaña.**

#### **4.4.1.4. Resultados en los controles de ablación**

En la tabla 4.4.1.4-A se muestran los datos de ablación promedio por periodo y los de

temperatura estimada, correspondiente a la zona donde se instaló la estación meteorológica automática sobre el hielo.

Los resultados de la reducción de la superficie del glaciar, observada en las estacas de ablación, se observan en la tabla 4.4.1.4-B, en la tabla se muestran los montos totales por periodo, la taza diaria correspondiente a cada punto de control y los promedios por periodo para las zonas inferior y superior del glaciar.

**Tabla 4.4.1.4-A. Relación entre T° y Ablación, por periodo y sector.**

<b>Sector</b>	<b>Periodo</b>	<b>T° promedio (°C)</b>	<b>Ablación diaria prom. (cm)</b>	<b>Ablación total (cm)</b>
<b>Superior</b>	<b>1°</b>	7,5	2,99	145
	<b>2°</b>	7,1	1,86	105
<b>Inferior</b>	<b>1°</b>	7,5	5,37	239
	<b>2°</b>	7,1	4,07	213

**Tabla 4.4.1.4-B. Resumen de los resultados de la ablación entre los controles.**

Nombre estaca	Fecha instalación	Fecha 1er control	Lapso (días) desde instalación al 1er control	Descenso de la superficie del glaciar (m) desde instalación al 1er control	Ablación (cm/día) desde instalación al 1er control	Fecha 2do control	Lapso (días) desde 1er control al 2do control	Descenso de la superficie del glaciar (m) desde 1er control al 2do control	Ablación (cm/día) desde 1er control al 2do control	Lapso (días) desde instalación al 2do control	Ablación (cm/día) desde instalación al 2do control
<b>Zona inferior del glaciar</b>											
AB1	19-12-2010	28-01-2011	40	2,53	6,33	22-03-2011	53	2,71	5,12	93	5,72
AB2	17-12-2010	28-01-2011	42	2,6	6,19	22-03-2011	53	2,26	4,27	95	5,23
AB3	17-12-2010	29-01-2011	43	2,27	5,28	22-03-2011	52	2,29	4,41	95	4,84
AB4	17-12-2010	29-01-2011	43	2,11	4,93	22-03-2011	52	1,83	3,53	95	4,23
AB5	17-12-2010	29-01-2011	43	2,17	5,05	22-03-2011	54	2,14	3,97	97	4,51
AB6	10-12-2010	03-02-2011	55	2,66	4,84	24-03-2011	49	1,73	3,53	104	4,39
AB7	17-12-2010	03-02-2011	48	2,39	4,98	24-03-2011	49	1,53	3,12	97	4,05
<b>Promedios</b>			<b>45</b>	<b>2,39</b>	<b>5,37</b>		<b>52</b>	<b>2,13</b>	<b>4,07</b>	<b>97</b>	<b>4,77</b>
<b>Zona superior del glaciar</b>											
ACN1	13-12-2010	02-02-2011	51	2,07	4,06	21-03-2011	47	0,93	1,97	98	3,01
ACN2	16-12-2010	02-02-2011	48	1,97	4,1	21-03-2011	47	1,06	2,26	95	3,91
ACN3	13-12-2010	02-02-2011	51	1,55	3,04	21-03-2011	47	1,36	0,64	98	2,2
ACN4	13-12-2010	02-02-2011	51	1,29	2,52	21-03-2011	47	0,55	1,16	98	1,16
ACN5	16-12-2010	02-02-2011	48	1,26	2,63	21-03-2011	47	0,52	1,11	95	1,87
ACO1	18-12-2010	31-01-2011	44	1,78	4,05	23-03-2011	51	1,43	2,81	95	2,81
ACO2	18-12-2010	31-01-2011	44	1,8	4,1	23-03-2011	51	1,45	2,85	95	2,85
ACO3	18-12-2010	31-01-2011	44	1,66	3,78	23-03-2011	51	1,07	2,09	95	2,09
ACO4	18-12-2010	31-01-2011	44	1,85	4,21	23-03-2011	51	1,49	2,92	95	2,92
ACO5	18-12-2010	31-01-2011	44	0,5	1,13	23-03-2011	51	0,57	1,13	95	1,13
<b>Promedios</b>			<b>48</b>	<b>1,45</b>	<b>2,99</b>		<b>49</b>	<b>1,05</b>	<b>1,86</b>	<b>96</b>	<b>2,54</b>

## 4.4.2. Determinaciones de densidad de la neviza

### 4.4.2.1. Puntos de medición y procedimiento

El programa de trabajo establecía obtener densidades de la neviza en pozos junto a las balizas tanto en la zona inferior del glaciar como en sus áreas altas, de acumulación. Sin embargo, fue posible encontrar espesores significativos de neviza en la zona inferior para su muestreo. En las zonas más altas del glaciar, correspondientes a las áreas de acumulación, no se encontraron espesores significativos. Por esta razón, se realizaron pozos para muestras de densidades solamente en las dos cuencas altas del glaciar, uno en cada cuenca. Se repitieron durante la temporada para observar los cambios de densidad (Figura 4.4.2.1-A).



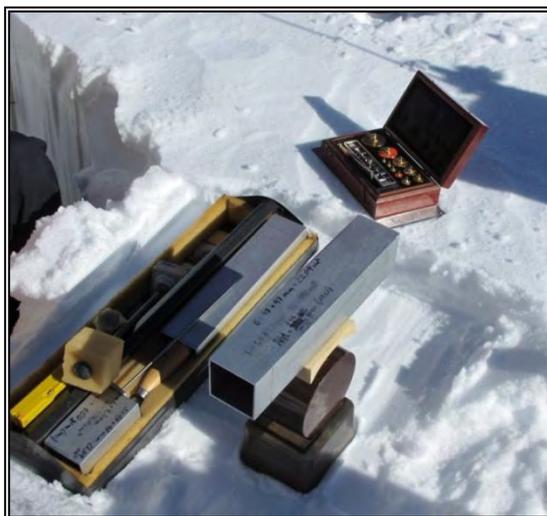
**Figura 4.4.2.1-A. Ubicación de los pozos para mediciones de densidad de nieve en el glaciar Universidad, en el verano 2010-2011.**

El pozo en la cuenca Norte se ubicó junto a la baliza ACN-5, a la cota 3.600 m. Se encontró en el pozo un espesor de neviza del invierno pasado de 85 cm de profundidad, establecida sobre la superficie de neviza más antigua, de inviernos anteriores y con densidades mayores a  $0,70 \text{ g/cm}^2$ .

El pozo en la cuenca Oeste se excavó junto a la baliza ACO-2, a la cota aproximada de

3.692 m. El manto de neviza del invierno recién pasado tenía un espesor de 75 cm, y estaba descansando en neviza más antigua y densa originada en precipitaciones de inviernos anteriores, según lo estableció el muestreador por la diferencia de densidad de la neviza encontrada en el pozo.

Los pozos se excavaron cuidadosamente y en orientación tal que al menos una cara del pozo quedara protegida de la luz directa del sol. En los pozos se observaron la estratigrafía e impurezas, se extrajeron muestras para mediciones de densidad cada 10 cm, y cada una inmediatamente debajo de la anterior, de manera de muestrear con continuidad toda la profundidad del pozo. En esto se empleó el equipo habitual para este procedimiento, que consiste de tubos muestreadores, placas metálicas, balanza (y pesas de calibración), lupa, cepillo, martillo de goma y la calibración de la pesa con pesos conocidos en terreno, al momento de efectuar las mediciones de densidad.



**Figura 4.4.2.1-B. Tubos muestreadores, balanza y otros elementos del equipo para medir densidad de nieve en las paredes de un pozo.**

#### **4.4.2.2. Resultados de las observaciones de densidad**

Los resultados de las observaciones de densidad de la neviza, realizadas durante cada una de las tres campañas en terreno, se muestran para los pozos en la cuenca Norte del glaciar en las tablas 4.4.2.2-A a 4.4.2.2-C, y para la cuenca Oeste se muestran en las tablas 4.4.2.2-D a 4.4.2.2-F. Cada muestra tiene 10 cm de longitud.

**Tabla 4.4.2.2–A. Resultados de las mediciones de densidad en pozo en la cuenca Norte del glaciar Universidad, en la 1° campaña a terreno.**

Densidades Neviza en Pozo Cuenca Norte				
		Profundidad media de la muestra (cm)	Temp hielo (°C.)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )
Hora	13:52	5	0	0,49
Fecha	16-12-010	15	0	0,51
Cota (m)	3.600	25	0	0,54
Aspecto	45°	35	0	0,55
Pendiente del terreno	5°	45	0	0,52
		55	0	0,57
Temperatura del aire °C	-2	65	0	0,53
Nubosidad	5/10	75	0	0,51
Posición UTM	N 6.165.608	85	0	0,48
	E 378.534	<b>Promedio</b>		<b>0,52</b>

**Tabla 4.4.2.2–B. Resultados de las mediciones de densidad en pozo en la cuenca Norte del glaciar Universidad, en la 2° campaña a terreno.**

Densidades neviza en pozo cuenca Norte				
		Profundidad media de la muestra (cm)	Temp hielo (°C)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )
Hora	12:50	5	0	0,68
Fecha	02-02-2011	15	0	0,71
Cota (m)	3.600	25	0	0,76
Aspecto	45°	35	0	0,74
Pendiente del terreno	5°	45	0	0,74
		55	0	0,74
Temperatura del aire °C	3	65	0	0,73
Nubosidad	3/10	75	0	0,75
Posición UTM	N 6.165.608	85	0	0,76
	E 378.534	<b>Promedio</b>		<b>0,74</b>

**Tabla 4.4.2.2–C. Resultados de las mediciones de densidad en pozo en la cuenca Norte del glaciar Universidad correspondiente a la 3° campaña a terreno.**

Densidades neviza en pozo cuenca Norte				
		Profundidad media de la muestra (cm)	Temp hielo (°C)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )
Hora	14:00	5	0	0,73
Fecha	21-3-2011	15	0	0,76
Cota (m)	3.600	25	0	0,80
Aspecto	45°	35	0	0,81
Pendiente del terreno	5°	45	0	0,78
		55	0	0,79
Temperatura del aire °C	2	65	0	0,80
Nubosidad	5/10	75	0	0,79
Posición UTM	N 6.165.608	85	0	0,81
	E 378.534	<b>Promedio</b>		<b>0,79</b>

**Tabla 4.4.2.2-D. Resultados de las mediciones de densidad en pozo en la cuenca Oeste del glaciar Universidad, en la 1° campaña a terreno.**

Densidades neviza en pozo cuenca Oeste				
		Profundidad media de la muestra (cm)	Temp hielo (°C)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )
Hora	18:00	5	0	0,49
Fecha	18-12-2010	15	0	0,50
Cota (m)	3.692	25	0	0,45
Aspecto	90°	35	0	0,47
Pendiente del terreno	10°	45	0	0,52
Temperatura del aire °C	-2	55	0	0,49
Nubosidad	3/10	65	0	0,47
Posición UTM	N 6.160.646	75	0	0,46
	E 375.248	<b>Promedio</b>		<b>0,48</b>

**Tabla 4.4.2.2-E. Resultados de las mediciones de densidad en pozo en la cuenca Oeste del glaciar Universidad, en la 2° campaña a terreno.**

Densidades neviza en pozo cuenca Oeste				
		Profundidad media de la muestra (cm)	Temp hielo (°C)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )
Hora	10:00	5	0	0,67
Fecha	31-1-2011	15	0	0,68
Cota (m)	3.692	25	0	0,72
Aspecto	90°	35	0	0,73
Pendiente del terreno	10°	45	0	0,70
Temperatura del aire °C	2	55	0	0,67
Nubosidad	5/10	65	0	0,68
Posición UTM	N 6.160.646	75	0	0,69
	E 375.248	<b>Promedio</b>		<b>0,69</b>

**Tabla 4.4.2.2-F. Resultados de las mediciones de densidad en pozo en la cuenca Oeste del glaciar Universidad, en la 3° campaña a terreno.**

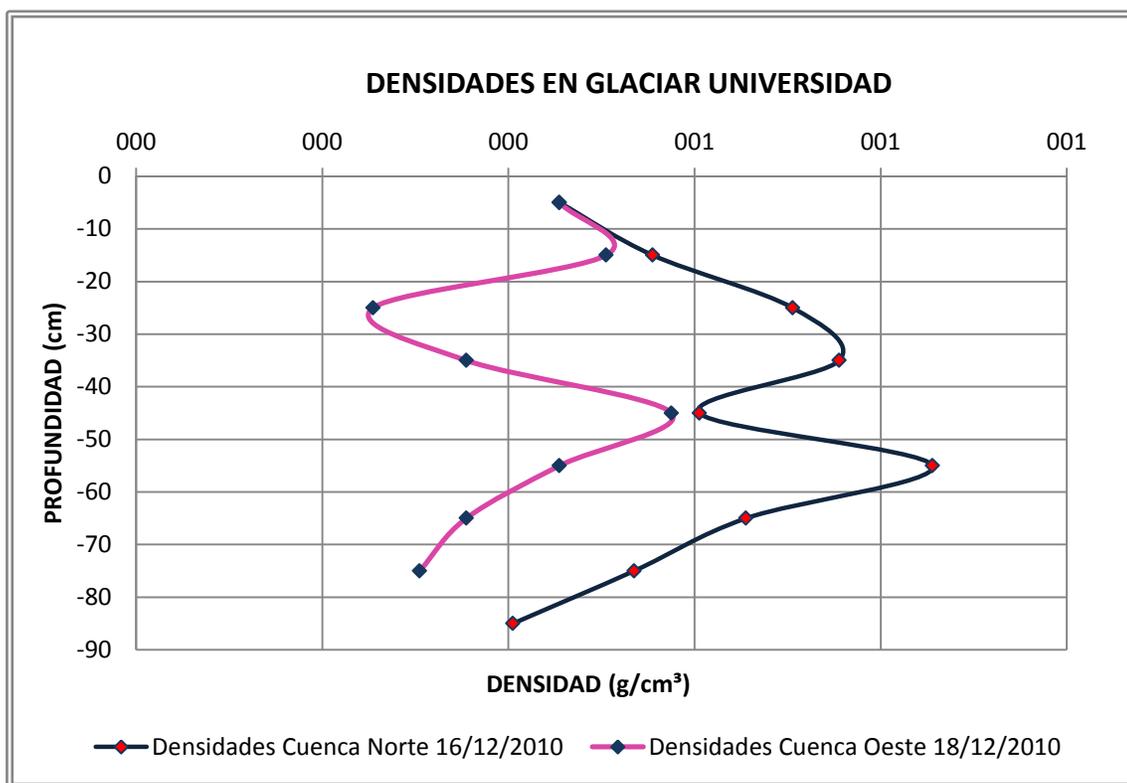
Densidades neviza en pozo cuenca Oeste				
		Profundidad media de la muestra (cm)	Temp. hielo (°C)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )
Hora	16:00	5	0	0,71
Fecha	23-3-2011	15	0	0,77
Cota (m)	3.692	25	0	0,78
Aspecto	90°	35	0	0,76
Pendiente del terreno	10°	45	0	0,75
Temperatura del aire °C	-2	55	0	0,72
Nubosidad	5/10	65	0	0,71
Posición UTM	N 6.160.646	75	0	0,72
	E 375.248	<b>Promedio</b>		<b>0,74</b>

En las figuras 4.4.2.2-A a 4.4.2.2-C, se muestra la variación de la densidad observada en los pozos de neviza con ocasión de los muestreos para densidad, comparando los

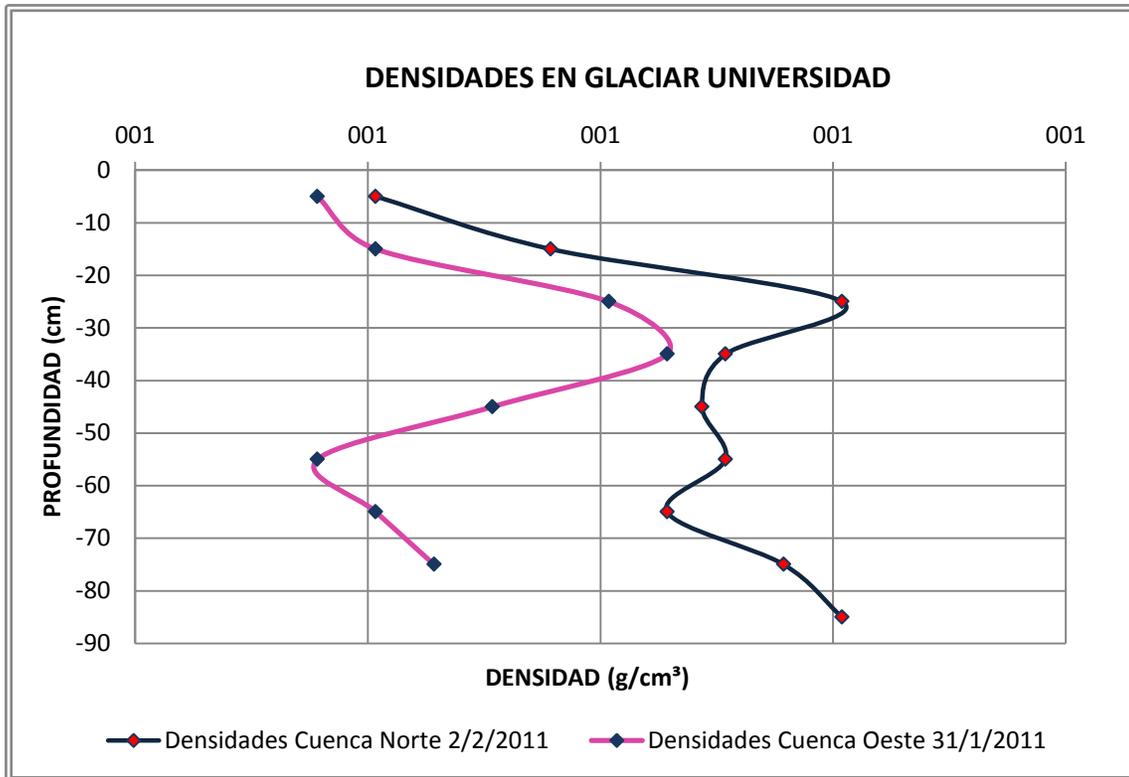
resultados obtenidos en fechas similares pero en los pozos de las cuencas Norte y Oeste del glaciar.

De las observaciones de densidad a lo largo del verano se estableció que en el primer control se muestreó el manto nival correspondiente a la acumulación remanente del último invierno. Las mediciones posteriores se efectuaron en el manto de neviza de inviernos anteriores, esto es evidenciado por las densidades encontradas, como se establece en las tablas de terreno que se incluyen en este capítulo, mostrando el proceso de integración de esta a la masa del glaciar.

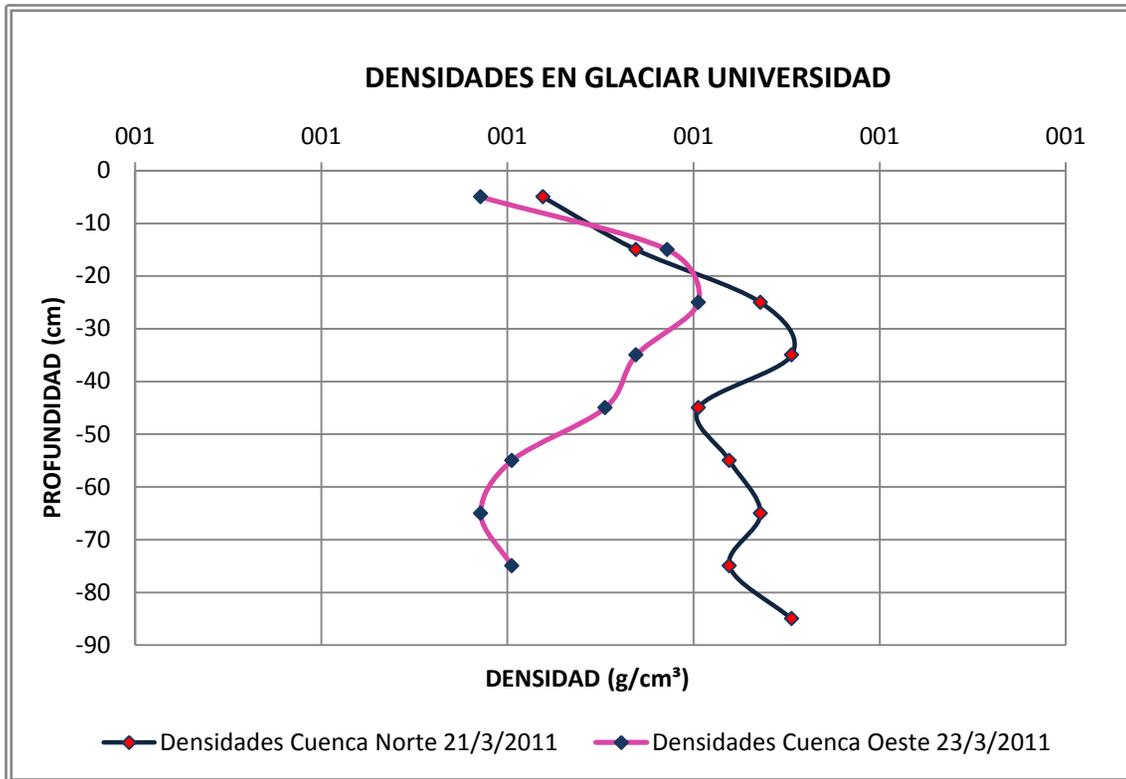
Las densidades de la neviza, en los pozos de la cuenca Norte y Oeste para un mismo periodo, son similares y representativas de las condiciones observadas en estos sectores, las diferencias que se observan entre las dos mediciones se deben principalmente a las características particulares de cada cuenca y lugar específico de excavación de cada uno.



**Figura 4.4.2.2-A. Variación de la densidad de la neviza con la profundidad en los pozos en las cuencas Norte y Oeste del glaciar Universidad, durante la 1º campaña.**



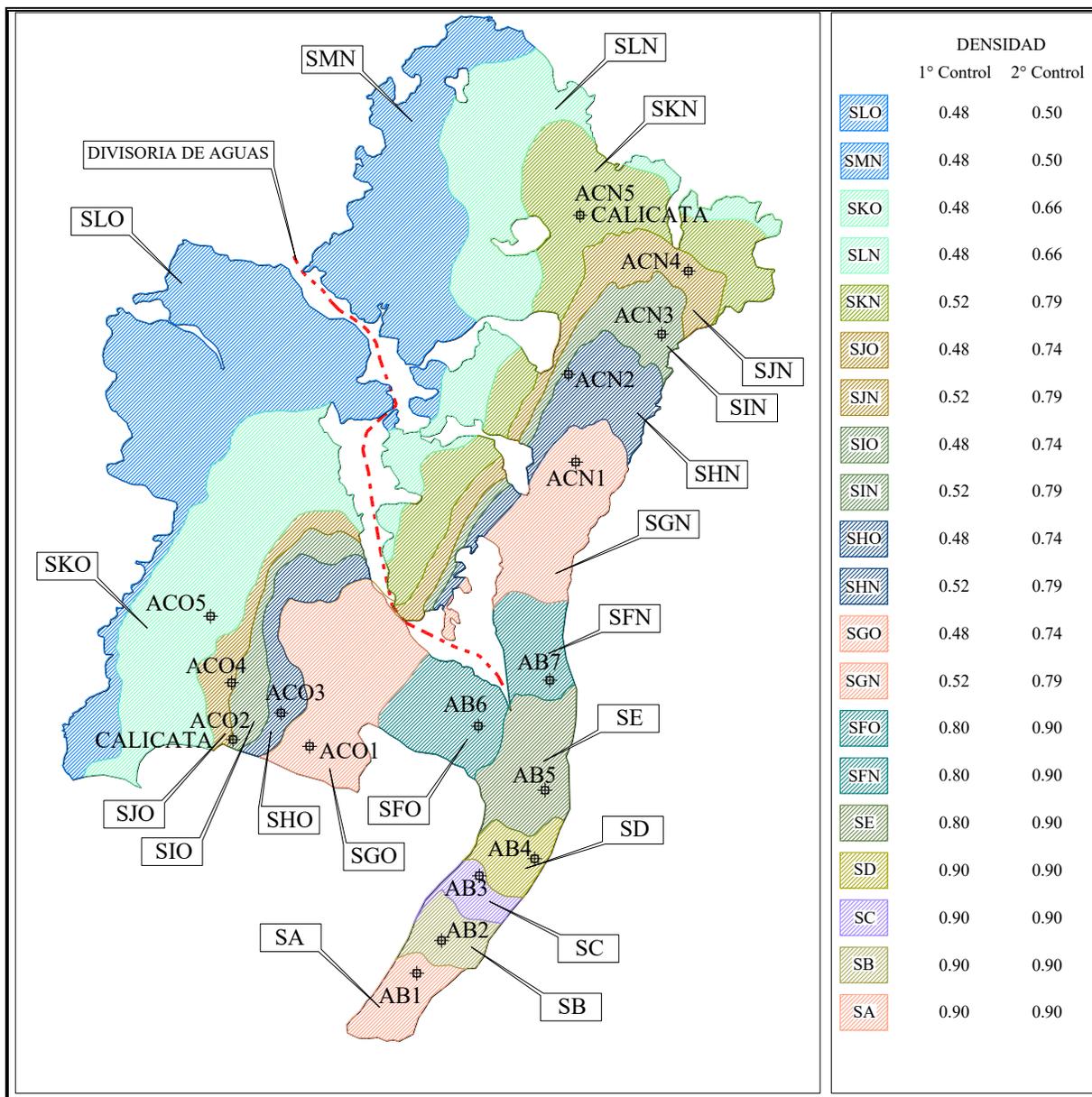
**Figura 4.4.2.2-B. Variación de la densidad de la neviza con la profundidad en los pozos en las cuencas Norte y Oeste del glaciar Universidad, durante la 2° campaña.**



**Figura 4.4.2.2-C. Variación de la densidad de la neviza con la profundidad en los pozos en las cuencas Norte y Oeste del glaciar Universidad, durante la 3a campaña.**

#### **4.4.3. El balance de masa Diciembre 2010 y Marzo de 2011**

Como puede estimarse de la tabla 4.4.1.4-B, durante el período de control de la ablación en las estacas instaladas en el glaciar, vale decir desde mediados de Diciembre de 2010 hasta los días del 21 al 24 de Marzo del 2011, el promedio de descenso de la superficie del glaciar Universidad, medido en las estacas ubicadas en su zona alta fue de 2,54 cm/día para un promedio de 96 días de controles. En las estacas ubicadas en zona inferior del glaciar este valor fue de 4,77 cm/día, en un periodo promedio de 97 días. Los sectores en que se ha dividido el glaciar para efectos de estimar el presente balance se muestran en la figura 4.4.3-A.



**Figura 4.4.3-A. Sectores en que se ha dividido el glaciar Universidad, considerados homogéneos en cuanto a densidades de la neviza y montos de ablación en los intervalos de tiempo analizados, para efectos de estimación del balance de masas.**

Durante este período, se instalaron las estacas y luego se controlaron en dos ocasiones. Se determinaron montos de ablación en dos intervalos de tiempo, el primero entre la instalación de estacas y el primer control, el segundo intervalo entre el primer y el segundo control.

Los valores promedio de descenso de la superficie del glaciar se refieren a profundidades de hielo en la zona inferior del glaciar, mientras que en la zona superior estas profundidades corresponden a neviza; es decir, se trata de volúmenes con densidades distintas entre sí.

En la tabla 4.4.3-A se observa la masa perdida en el glaciar durante el período en que se controlaron las estacas de ablación. Esta información se obtuvo empleando la tasa de ablación medida en puntos (estacas), asignando a cada punto un área de representatividad de manera que la suma de éstas cubriera toda la superficie del glaciar (la que comprende 27,5 km<sup>2</sup>. Para el hielo se utilizó la densidad de 0,9 g/cm<sup>3</sup>).

La masa perdida por el glaciar durante los dos intervalos de tiempo que van entre la instalación de las balizas, y el segundo control de estas, un período de aproximadamente 98 días, es de 4,04E+13 g de hielo y neviza. Esta masa representa un aporte hídrico como caudal medio constante en el período, de 4,77 m<sup>3</sup>/s.

El posible error en la estimación anterior proviene de la adjudicación de un área representativa a cada estaca, y una densidad de los materiales (hielo y/o neviza) encontrados a cada área basada en los datos de densidad de la neviza medida en pozos. Por el primer parámetro, el error lo estimamos del orden de +/-15%, por el segundo del orden de +/- 5%. En consecuencia el error total es del orden de +/- 20%.

**Tabla 4.4.3-A. Masa total perdida en la superficie del glaciar Universidad, Diciembre de 2010 y Marzo de 2011.**

Área	Superficie (cm2)	Nombre estaca	Fecha instalación estacas	Fecha 1er control	Intervalo entre instalación y 1er control (días)	Descenso de la superficie del glaciar (cm)	Densidad (g/cm3)	Masa perdida en intervalo (g)	Fecha 2do control	Intervalo entre 1er y 2do control (días)	Descenso de la superficie del glaciar (cm)	Densidad (g/cm3)	Masa perdida en intervalo (g)	Masa total perdida en período (g)
SA	4,59E+09	AB1	19-12-2010	28-01-2011	40	-253	0,90	-1,05E+12	22-03-2011	53	-271	0,90	-1,12E+12	-2,17E+12
SA	3,90E+09	AB2	17-12-2010	28-01-2011	42	-260	0,90	-9,12E+11	22-03-2011	53	-226	0,90	-7,93E+11	-1,71E+12
SC	2,61E+09	AB3	17-12-2010	29-01-2011	43	-227	0,90	-5,32E+11	22-03-2011	52	-229	0,90	-5,37E+11	-1,07E+12
SD	3,92E+09	AB4	17-12-2010	29-01-2011	43	-211	0,90	-7,44E+11	22-03-2011	52	-183	0,90	-6,45E+11	-1,39E+12
SE	9,14E+09	AB5	17-12-2010	29-01-2011	43	-217	0,80	-1,59E+12	22-03-2011	54	-214	0,90	-1,76E+12	-3,35E+12
SFO	8,87E+09	AB6	10-12-2010	03-02-2011	55	-266	0,80	-1,89E+12	24-03-2011	49	-173	0,90	-1,38E+12	-3,27E+12
SFN	5,85E+09	AB7	17-12-2010	03-02-2011	48	-239	0,80	-1,12E+12	24-03-2011	49	-153	0,90	-8,05E+11	-1,92E+12
SGN	1,32E+10	ACN1	13-12-2010	02-02-2011	51	-207	0,52	-1,42E+12	21-03-2011	47	-93	0,79	-9,71E+11	-2,39E+12
SHN	9,77E+09	ACN2	16-12-2010	02-02-2011	48	-197	0,52	-1,00E+12	21-03-2011	47	-106	0,79	-8,18E+11	-1,82E+12
SIN	8,22E+09	ACN3	13-12-2010	02-02-2011	51	-155	0,52	-6,62E+11	21-03-2011	47	-136	0,79	-8,83E+11	-1,54E+12
SJN	1,10E+10	ACN4	13-12-2010	02-02-2011	51	-129	0,52	-7,40E+11	21-03-2011	47	-55	0,79	-4,79E+11	-1,22E+12
SKN	2,75E+10	ACN5	16-12-2010	02-02-2011	48	-126	0,52	-1,80E+12	21-03-2011	47	-52	0,79	-1,13E+12	-2,93E+12
SLN	2,86E+10	cACO5	18-12-2010	31-01-2011	44	-113	0,48	-1,55E+12	23-03-2011	51	-57	0,66	-1,08E+12	-2,63E+12
SMN	2,87E+10	cACO5	18-12-2010	31-01-2011	44	-113	0,48	-1,56E+12	23-03-2011	51	-57	0,50	-8,19E+11	-2,38E+12
SGO	1,72E+10	ACO1	18-12-2010	31-01-2011	44	-178	0,48	-1,47E+12	23-03-2011	51	-143	0,74	-1,82E+12	-3,29E+12
SIO	5,33E+09	ACO2	18-12-2010	31-01-2011	44	-180	0,48	-4,60E+11	23-03-2011	51	-145	0,74	-5,71E+11	-1,03E+12
SHO	6,39E+09	ACO3	18-12-2010	31-01-2011	44	-166	0,48	-5,09E+11	23-03-2011	51	-107	0,74	-5,06E+11	-1,02E+12
SJO	5,24E+09	ACO4	18-12-2010	31-01-2011	44	-185	0,48	-4,66E+11	23-03-2011	51	-149	0,74	-5,78E+11	-1,04E+12
SKO	3,28E+10	ACO5	18-12-2010	31-01-2011	44	-50	0,48	-7,86E+11	23-03-2011	51	-57	0,66	-1,23E+12	-2,02E+12
SLO	4,26E+10	cACO5	18-12-2010	31-01-2011	44	-50	0,48	-1,02E+12	23-03-2011	51	-57	0,50	-1,21E+12	-2,24E+12
							<b>Total</b>	<b>-2,13E+13</b>				<b>Totales</b>	<b>-1,91E+13</b>	<b>-4,04E+13</b>

La estimación del error de 15% se origina en la dispersión de estimaciones de espesor del manto de nieve en una cierta área. Esta dispersión se refiere a numerosas mediciones, ocasionales y aleatorias, de espesor del manto de nieve con varillas de sondaje, realizadas durante los diversos recorridos por el glaciar para los distintos controles y mediciones.

Respecto al segundo error, este ocurre porque la densidad de la nieve o neviza no es uniforme en cada sector del glaciar (como lo revelan los resultados de las mediciones de los mismos pozos realizados en el glaciar). La cantidad de pozos ejecutados es insuficiente para desarrollar, en base a ellos, una estadística de las variaciones de densidad, pero las diferencias entre pozos señala un posible error como el que se indica.

#### **4.4.4. Estimación del balance de masa anual**

##### **4.4.4.1. Aspectos generales**

La presente estimación del balance de masa anual en la superficie del glaciar Universidad, debe entenderse como la masa perdida o ganada, y su equivalente en agua, para el periodo comprendido entre el término de la temporada de ablación del año 2010, y el término de la temporada de ablación del año 2011.

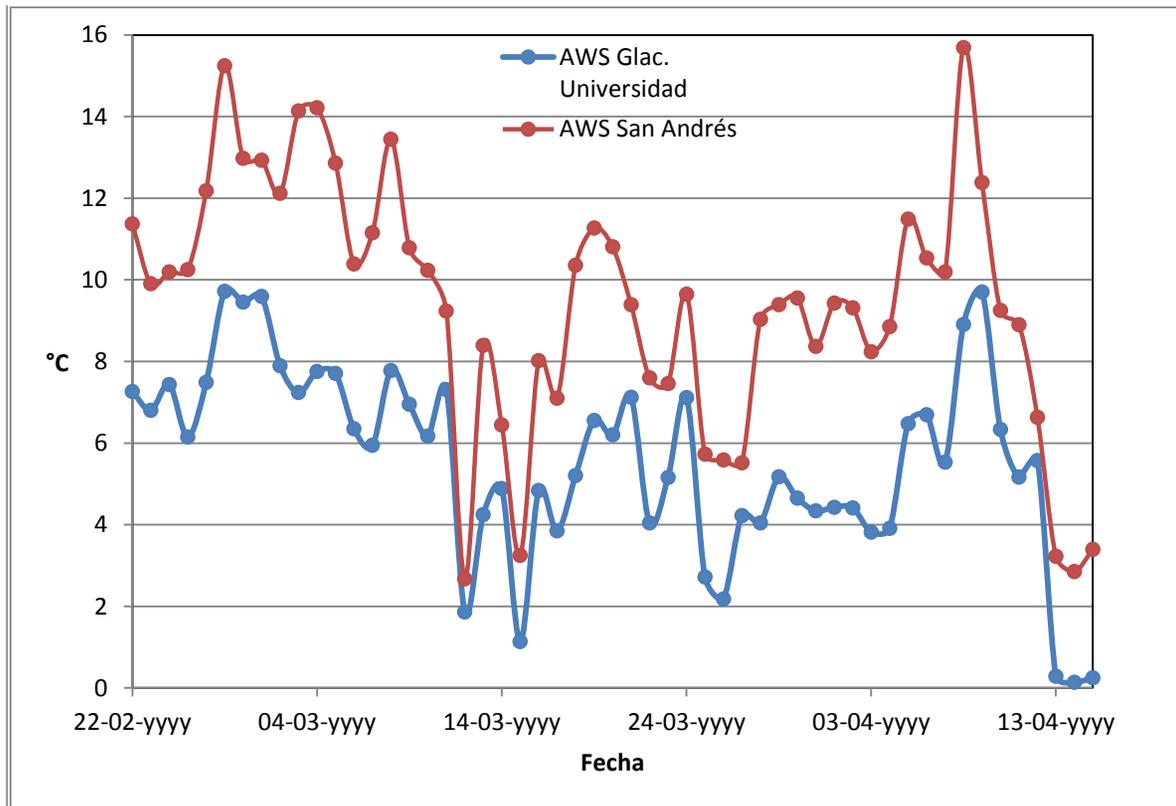
Los sectores en que se ha dividido el glaciar para estimar sus balances de masas, se muestran en la figura 4.4.3-A.

La superficie de ablación del término de la temporada de verano 2010 se considera como aquella representada por la superficie de hielo (en la parte inferior del glaciar) o neviza (en la parte superior del glaciar) que fue cubierta por el manto de nieve del invierno 2010.

Se realizó un primer reconocimiento de las condiciones de nieve en el área del glaciar el 24 de Septiembre de 2010. Se encontró todo el glaciar cubierto de nieve con pequeñas superficies expuestas (de pocos metros cuadrados) de hielo cerca del frente. Una nueva visita al glaciar se realizó los días 16 y 17 de Noviembre de 2010, encontrándose libre de nieve toda la parte inferior del glaciar, hasta la cota aproximada de 2.800 m.

La figura 4.4.4.1-A muestra la diferencia de temperatura entre la estación San Andrés y la estación instalada en el glaciar, durante un periodo de tiempo comprendido entre el 22

de Febrero del 2011 y el 15 de Abril del 2011. Durante este periodo se obtuvieron registros en la estación ubicada en el glaciar que permiten establecer una relación entre estos puntos de control, para determinar promedios por periodo, apoyar la definición de las fechas de inicio y término de la temporada de ablación.



**Figura 4.4.4.1-A. Comparación de temperaturas entre estación San Andrés y estación en el glaciar durante el periodo que se obtuvieron datos en forma paralela.**

Considerando lo anterior, y la probable temperatura ambiente derivada de comparaciones entre las temperaturas registradas en las estaciones San Andrés y aquella del glaciar Universidad, se ha estimado el inicio de la temporada de ablación para la superficie del glaciar el día 2 de Octubre del año 2010. De la misma manera se estimó el término del período veraniego de pérdida de masa en el glaciar, como también se muestra en las tablas antes referida. La fecha de término de la ablación es el día 5 de Junio de 2011.

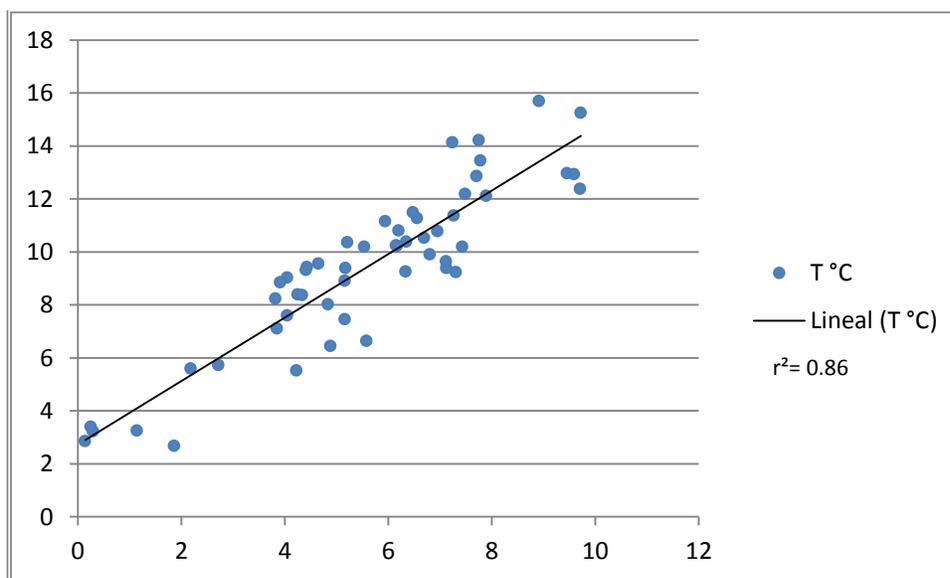
El monto de ablación que afecta a la superficie proviene de las tasas diarias de ablación observadas en las estacas de ablación en los intervalos de tiempo con controles. Se atribuye la mitad de las tasas iniciales o finales observadas a los intervalos de tiempo

respectivos antes o después del período de controles (la mitad puesto que la tasa diaria se inicia y concluye en cero).

#### 4.4.4.2. Estimaciones de temperatura de inicio y término de la temporada de ablación

Basado en la información recopilada durante el periodo de observaciones en terreno y extrapolando hacia la zona de estudio los datos de temperatura provenientes de lugares cercanos con características similares, se llega a determinar el periodo del año correspondiente a la temporada de ablación en el glaciar Universidad.

Se ha utilizado para esto los datos de temperatura obtenida de la estación meteorológica de San Andrés, con lo que se ha calculado la diferencia entre este lugar la estación meteorológica automática ubicada sobre el glaciar obteniendo una diferencia en promedio de 3,8° C menos sobre el glaciar (Figura 4.4.4.2-A). De ello resulta un valor de gradiente vertical de temperatura igual a  $-0,0092^{\circ}$  por metro de elevación. El gráfico que muestra el coeficiente de correlación entre las temperaturas de la estación meteorológica San Andrés y la estación del glaciar Universidad se observa en la figura 4.4.4.2-A, este coeficiente corresponde a 0,86.



**Figura 4.4.4.2-A. Comparación de temperaturas entre estación San Andrés y estación en el glaciar durante el periodo que se obtuvieron datos en forma paralela.**

Con esta información se ha definido que la temporada de ablación comienza cuando la temperatura promedio en periodos de 24 hrs supera los 0°C. A la altura que fue instalada

la estación meteorológica automática sobre el glaciar, la temporada de ablación comenzó el día 02 de Octubre del año 2010, y se extendió hasta el día 05 de Junio del año 2011, día en que la temperatura diaria promedio descendió bajo los 0°C nuevamente. No se manejan registros específicos en la zona después del día 15 de Abril 2011. La información pública de precipitación en la región y los registros de temperatura de la estación San Andrés, son utilizados para este estudio.

Las tasas de ablación por periodo para cada área se han estimado utilizando la información de ablación en las estacas y de la superficie de neviza vieja en los pozos, y observaciones de terreno respecto a cuándo se observó la aparición de la superficie de hielo o de neviza vieja (superficie más oscura) en sectores particulares del glaciar.

#### **4.4.4.3. Estimaciones de densidad por área**

Para determinar la densidad de la neviza de la temporada, y de la neviza de eventos anteriores, en cada una de las áreas en que se dividió el glaciar (cada área con al menos una estaca de ablación) se ha utilizado como base la información de densidad recopilada durante las campañas a terreno en los pozos excavados para este propósito. Con estos antecedentes se adjudicaron densidades a los espesores de nieve perdidos o ganados al término del año para el cual se estima el balance de masa anual.

Se han estimado las condiciones que podrían encontrarse en el glaciar en el periodo comprendido entre el inicio de la temporada de ablación y la primera campaña, así como entre la fecha del último control en las balizas de ablación y el fin de la temporada de ablación. Para esto nos hemos basado en información obtenida a través de fotografías tomadas durante la visita preliminar que se realizó antes de iniciar los trabajos en terreno, y en la información obtenida de fotografías tomadas durante la última campaña a terreno.

#### **4.4.4.4. Estimación de espesor de la neviza remanente de la última temporada invernal**

Se realizaron calicatas en dos puntos de la supuesta zona de acumulación, que también corresponden a puntos de posible acceso en esta zona, la estimación de acumulación máxima en los sectores más altos, se efectúa de las observaciones en terreno durante la última campaña.

Basado en antecedentes sobre la cantidad de precipitación nival durante el invierno del año 2010 en la zona central del país a 3.000 m.s.n.m., más algunos registros fotográficos obtenidos durante una expedición invernal al Volcán Palomo que se realizó en Julio de año 2010 accediendo a través de la cuenca Norte del glaciar Universidad, se estima que al fin del invierno en los sectores más altos del glaciar Universidad se acumularon aproximadamente 3,5 m de nieve.

Las calicatas se realizaron a una profundidad posible con el equipo utilizado, hasta el punto en que la densidad encontrada lo permitió. Neviza con densidades superiores a las observadas se considera parte de la masa del glaciar

Por otra parte, recorridos a pie por la parte más alta del glaciar el día 23 de Marzo de 2011, con ocasionales sondeos de profundidad de nieve, permiten estimar la profundidad media de la nieve remanente de la temporada invernal en 98 cm.

Se determinó una pequeña tasa de ablación entre la fecha de los recorridos a fines de Marzo y la fecha de 14 de Mayo 2011, esta se ha considerado que es más representativa (como media) que aquella de cese del proceso de ablación veraniega en el sector más alto del glaciar.

#### **4.4.4.5. Resultados**

Se han definido cuatro intervalos de tiempo para el análisis de la pérdida o ganancia de masa en los diferentes sectores en que se dividió el glaciar. A cada sector se le atribuyó una fecha de inicio del período de ablación veraniega que afecta a la superficie glaciar en el verano 2010, esta fue identificada como hielo o neviza vieja con un estrato de hasta 3 cm de espesor de neviza sucia por la presencia de material particulado. Estas fechas, para cada sector del glaciar, se muestran en las tablas 4.4.4.5-A a 4.4.4.5-D. De manera similar, y como se indicó previamente, se atribuyó a cada sector una fecha de término del proceso de ablación.

Como se señaló anteriormente, a cada sector se le atribuye una densidad del material perdido o ganado durante los intervalos en que es afectada la superficie de 2010, según los antecedentes de densidad disponibles.

Finalmente, se obtiene la masa perdida o ganada en cada sector del glaciar durante un

intervalo de tiempo multiplicando su área por el manto de ablación estimado y por la densidad estimada del material ganado o perdido. El resultado de este ejercicio, calculado en intervalos de días y por sector, se muestra en las tablas 4.4.4.5-A a 4.4.4.5-D. En las tablas se observa el monto de ablación o de masa ganada remanente al final del período veraniego en la parte más alta del glaciar. También se muestra la densidad del material en los intervalos de días, la superficie de cada sector y la masa anual total ganada o pérdida. El total para todo el período corresponde a  $-4,68E+13$  g (Tabla 4.4.4.5-D).

**Tabla 4.4.4.5-A. Pérdida de masa en el glaciar Universidad, con respecto a la superficie de fin del verano 2010, en el intervalo de tiempo desde las diferentes fechas estimadas de inicio de la temporada veraniega de ablación 2010-2011 hasta las fechas de instalación de las estacas de ablación.**

Área	Superficie (cm <sup>2</sup> )	Nombre estaca	Fecha inicio ablación	Fecha instalación estacas, o inicio ablación	Intervalo entre inicio ablación e instalación estacas (días)	Descenso de la superficie del glaciar (cm)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Masa perdida en intervalo (g)
SA	4.591.250.000	AB1	02-10-2010	19-12-2010	78	-296	0,9	-1,22E+12
SA	3.898.920.000	AB2	16-10-2010	17-12-2010	62	-230	0,9	-8,07E+11
SC	2.606.390.000	AB3	30-10-2010	17-12-2010	48	-152	0,9	-3,56E+11
SD	3.918.800.000	AB4	15-11-2010	17-12-2010	32	-94	0,9	-3,33E+11
SE	9.144.130.000	AB5	30-11-2010	17-12-2010	17	-51	0,9	-4,23E+11
							<b>Total</b>	<b>-3,14E+12</b>

**Tabla 4.4.4.5-B. Pérdida de masa en el glaciar Universidad, respecto a la superficie de fin del verano 2010, en el intervalo de tiempo desde las fechas estimadas de inicio de la temporada veraniega de ablación 2010-2011.**

Área	Superficie (cm <sup>2</sup> )	Nombre estaca	Fecha instalación estacas, o inicio ablación	Fecha 1° control o inicio ablación	Intervalo entre instalación o inicio ablación y 1° control (días)	Descenso de la superficie del glaciar (cm)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Masa perdida en intervalo (g)
SA	4.591.250.000	AB1	19-12-2010	28-01-2011	40	-253	0,9	-1,05E+12
SA	3.898.920.000	AB2	17-12-2010	28-01-2011	42	-260	0,9	-9,12E+11
SC	2.606.390.000	AB3	17-12-2010	29-01-2011	43	-227	0,9	-5,32E+11
SD	3.918.800.000	AB4	17-12-2010	29-01-2011	43	-211	0,9	-7,44E+11
SE	9.144.130.000	AB5	17-12-2010	29-01-2011	43	-217	0,9	-1,79E+12
SFO	8.867.850.000	AB6	17-12-2010	03-02-2011	48	-266	0,9	-2,12E+12
SFN	5.845.890.000	AB7	17-12-2010	03-02-2011	48	-239	0,9	-1,26E+12
SGN	13.211.950.000	ACN1	23-12-2010	02-02-2011	41	-166	0,9	-1,97E+12
SHN	9.767.020.000	ACN2	29-12-2010	02-02-2011	35	-144	0,9	-1,27E+12
SIN	8.216.310.000	ACN3	04-01-2011	02-02-2011	29	-88	0,9	-6,51E+11
SJN	11.026.350.000	ACN4	13-01-2011	02-02-2011	20	-50	0,8	-4,41E+11
SKN	27.460.600.000	ACN5	17-01-2011	02-02-2011	16	-41	0,8	-9,01E+11
SGO	17.190.500.000	ACO1	24-12-2010	31-01-2011	38	-154	0,9	-2,38E+12
SIO	5.325.850.000	ACO2	05-01-2011	31-01-2011	26	-105	0,8	-4,47E+11
SHO	6.391.120.000	ACO3	02-01-2011	31-01-2011	29	-110	0,9	-6,33E+11
SJO	5.244.040.000	ACO4	15-01-2011	31-01-2011	16	-40	0,8	-1,68E+11
							<b>Total</b>	<b>-1,73E+13</b>

**Tabla 4.4.4.5-C. Pérdida de masa en el glaciar Universidad, con respecto a la superficie de fin del verano 2010, en el intervalo de tiempo desde las diferentes fechas estimadas de inicio de la temporada veraniega de ablación 2010-2011.**

Área	Superficie (cm2)	Nombre estaca	Fecha 1° control o inicio ablación	Fecha 2° control	Intervalo entre 1° control o inicio ablación y 2° control (días)	Descenso de la superficie del glaciar (cm)	Densidad (g/cm3)	Masa perdida en intervalo (g)
SA	4.591.250.000	AB1	28-01-2011	22-03-2011	53	-271	0,9	-1,12E+12
SA	3.898.920.000	AB2	28-01-2011	22-03-2011	53	-226	0,9	-7,93E+11
SC	2.606.390.000	AB3	29-01-2011	22-03-2011	52	-229	0,9	-5,37E+11
SD	3.918.800.000	AB4	29-01-2011	22-03-2011	52	-183	0,9	-6,45E+11
SE	9.144.130.000	AB5	29-01-2011	22-03-2011	52	-214	0,9	-1,76E+12
SFO	8.867.850.000	AB6	03-02-2011	24-03-2011	49	-173	0,9	-1,38E+12
SFN	5.845.890.000	AB7	03-02-2011	24-03-2011	49	-153	0,9	-8,05E+11
SGN	13.211.950.000	ACN1	02-02-2011	21-03-2011	47	-93	0,9	-1,11E+12
SHN	9.767.020.000	ACN2	02-02-2011	21-03-2011	47	-106	0,9	-9,32E+11
SIN	8.216.310.000	ACN3	02-02-2011	21-03-2011	47	-136	0,9	-1,01E+12
SJN	11.026.350.000	ACN4	02-02-2011	21-03-2011	47	-55	0,85	-5,15E+11
SKN	27.460.600.000	ACN5	02-02-2011	21-03-2011	47	-52	0,8	-1,14E+12
SLN	28.580.970.000	ACO5	05-03-2011	23-03-2011	18	-20	0,74	-4,23E+11
SGO	17.190.500.000	ACO1	31-01-2011	23-03-2011	51	-143	0,9	-2,21E+12
SIO	5.325.850.000	ACO2	31-01-2011	23-03-2011	51	-145	0,8	-6,18E+11
SHO	6.391.120.000	ACO3	31-01-2011	23-03-2011	51	-107	0,9	-6,15E+11
SJO	5.244.040.000	ACO4	31-01-2011	23-03-2011	51	-149	0,8	-6,25E+11
SKO	32.765.830.000	ACO5	11-03-2011	23-03-2011	12	-14	0,74	-3,39E+11
							<b>Totales</b>	<b>-1,66E+13</b>

**Tabla 4.4.4.5-D. Pérdida de masa en el glaciar Universidad, con respecto a la superficie de fin del verano 2010, en el intervalo de tiempo desde las diferentes fechas estimadas de inicio de la temporada veraniega de ablación 2010-2011.**

Área	Superficie (cm <sup>2</sup> )	Nombre estaca	Fecha 2° control	Fecha estimada fin ablación	Intervalo entre 2° control y fin periodo ablación	Cambio de la superficie del glaciar (cm)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Masa perdida en intervalo (g)	Masa total perdida ganada en un año (g)
SA	4.591.250.000	AB1	22-03-2011	05-06-2011	75	-232	0,9	-9,58E+11	-4,34E+12
SA	3.898.920.000	AB2	22-03-2011	04-06-2011	74	-190	0,9	-6,67E+11	-3,18E+12
SC	2.606.390.000	AB3	22-03-2011	02-06-2011	72	-192	0,9	-4,49E+11	-1,87E+12
SD	3.918.800.000	AB4	22-03-2011	31-05-2011	70	-149	0,9	-5,26E+11	-2,25E+12
SE	9.144.130.000	AB5	22-03-2011	29-05-2011	68	-163	0,9	-1,34E+12	-5,31E+12
SFO	8.867.850.000	AB6	24-03-2011	27-05-2011	64	-136	0,9	-1,09E+12	-4,59E+12
SFN	5.845.890.000	AB7	24-03-2011	25-05-2011	62	-117	0,9	-6,13E+11	-2,68E+12
SGN	13.211.950.000	ACN1	21-03-2011	23-05-2011	63	-75	0,9	-8,91E+11	-3,97E+12
SHN	9.767.020.000	ACN2	21-03-2011	21-05-2011	61	-83	0,9	-7,29E+11	-2,93E+12
SIN	8.216.310.000	ACN3	21-03-2011	19-05-2011	59	-48	0,9	-3,58E+11	-2,01E+12
SJN	11.026.350.000	ACN4	21-03-2011	17-05-2011	57	-40	0,86	-3,78E+11	-1,33E+12
SKN	27.460.600.000	ACN5	21-03-2011	15-05-2011	55	-37	0,82	-8,30E+11	-2,87E+12
SLN	28.580.970.000	ACO5	23-03-2011	14-05-2011	52	-35	0,76	-7,68E+11	-1,19E+12
SMN	28.736.790.000	ACO5	23-09-2010	10-05-2011	229	98	0,5	1,41E+12	1,41E+12
SGO	17.190.500.000	ACO1	23-03-2011	23-05-2011	61	-103	0,9	-1,59E+12	-6,19E+12
SIO	5.325.850.000	ACO2	23-03-2011	19-05-2011	57	-98	0,82	-4,28E+11	-1,49E+12
SHO	6.391.120.000	ACO3	23-03-2011	21-05-2011	59	-74	0,9	-4,28E+11	-1,68E+12
SJO	5.244.040.000	ACO4	23-03-2011	16-05-2011	54	-95	0,82	-4,09E+11	-1,20E+12
SKO	32.765.830.000	ACO5	23-03-2011	14-05-2011	52	-35	0,76	-8,81E+11	-1,22E+12
SLO	42.610.020.000	ACO5	23-09-2010	10-05-2011	229	98	0,5	2,09E+12	2,09E+12
								<b>-9,83E+12</b>	<b>-4,68E+13</b>

Como resumen, el balance de masas de la superficie del glaciar Universidad, durante el año fin verano 2010 a fin verano de 2011 es como sigue:

Masa ganada en sectores (SLO y SMN) altos del glaciar ..... 3,50E+12 g.  
Masa perdida en el resto de los **sectores del glaciar**..... -5,03E+13 g.  
**BALANCE**..... **-4,68E+13 g.**

Así, y de manera muy general, puede decirse que el glaciar, de 27,54 km<sup>2</sup> de extensión, perdió en el año que analizamos un promedio de 169,98 g/cm<sup>2</sup> de su superficie.

También se puede señalar que el balance negativo de masa del glaciar significa un aporte hídrico al Río San Andrés del orden de 1,24 m<sup>3</sup>/s como promedio anual, y más bien del orden de 1,86 m<sup>3</sup>/s como promedio distribuido entre los meses de Octubre a Mayo. Esta información se obtiene del balance de masa y su equivalente realizado en este estudio.

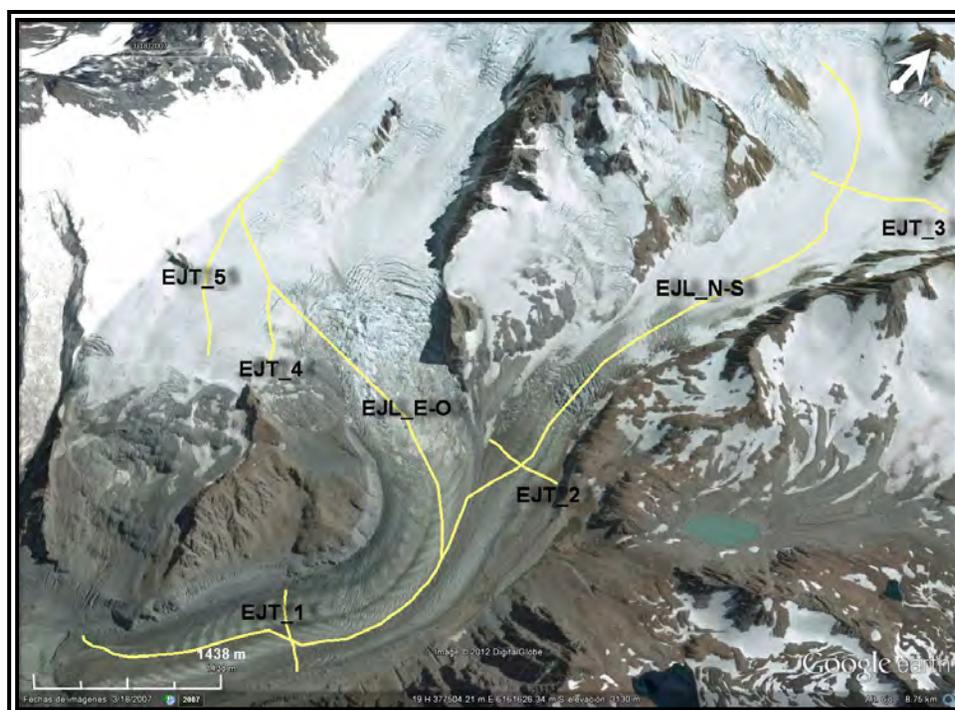
El posible error en la estimación del balance anual de masa del glaciar Universidad proviene de la adjudicación de un área representativa a cada estaca y una densidad de los materiales (hielo y/o neviza) encontrados a cada área basada en los datos de densidad de la neviza medida en pozos. Una muy somera exploración con varillas de sondaje revela variaciones en el espesor del área representada por cada una. Por el primer parámetro, el error lo estimamos del orden de +/-15%, por el segundo del orden de +/- 5%. Posibles errores adicionales pueden ocurrir en las fechas de inicio o término de la temporada veraniega de ablación, lo cual se estima que incide en un 2% a 3% en el balance. En consecuencia el error total es del orden de +/- 22% a +/- 23%.

#### **4.4.5. Levantamiento geodésico de puntos en perfiles sobre el glaciar**

##### **4.4.5.1. Elección de rutas del levantamiento**

Con el propósito de contar con información precisa de coordenadas y cotas de puntos en el glaciar Universidad, que pudieran compararse en años futuros con mediciones similares, se realizaron rutas sobre las cuencas Norte y Oeste del glaciar Universidad y sobre la lengua del glaciar, midiendo en cada punto las coordenadas y cotas con GPS geodésico de precisión. Las rutas cubrieron el eje longitudinal del glaciar en su lengua terminal y en ambas cuencas superiores, y al menos dos ejes transversales en cada cuenca del glaciar (Figura 4.4.5.1-A) y en la lengua terminal. La cuenca Oeste se

encontraba muy agrietada, lo que dificultó el avance y obligó a modificar algunas de las rutas previamente diseñadas.



**Figura 4.4.5.1-A. Rutas longitudinales y transversales en el glaciar Universidad donde se realizó el levantamiento geodésico.**

#### **4.4.5.2. Equipos utilizados en el levantamiento**

Para el levantamiento geodésico se utilizó un equipo GPS Trimble Pathfinder ProXRT con capacidad OmniStar HP de precisión disimétrica en tiempo real. Como es habitual en los trabajos en montaña, este instrumento se monta en una mochila convencional (Figura 4.4.5.2-A) la cual tiene un espacio de salida para la antena. El técnico lleva a mano un PDA (personal digital assistant) que se conecta vía Bluetooth con la unidad GPS. Las mediciones se tomaron aproximadamente cada 50 m. La información queda almacenada en el dispositivo PDA y GPS simultáneamente. En el PDA se ingresa la altura de la antena sobre el terreno, y se programa para que esta altura se reste automáticamente del registro de la cota de la superficie de manera que los datos obtenidos corresponden a la cota a la altura del suelo.



**Figura 4.4.5.2-A. Toma de datos en la unidad PDA.**

#### **4.4.5.3. Mediciones**

Las mediciones con GPS geodésico fueron realizadas por un equipo de 3 montañistas de Geoestudios. (Figuras 4.4.5.3-A y 4.4.5.3-B).

En los tramos superiores de las cuencas Norte y Oeste se encontraron grandes campos de grietas, por lo que fue necesario instalar seguros (tornillos de hielo y estacas) y moverse gran parte del tiempo encordados, lo que hizo que el progreso sobre el glaciar fuera especialmente lento.



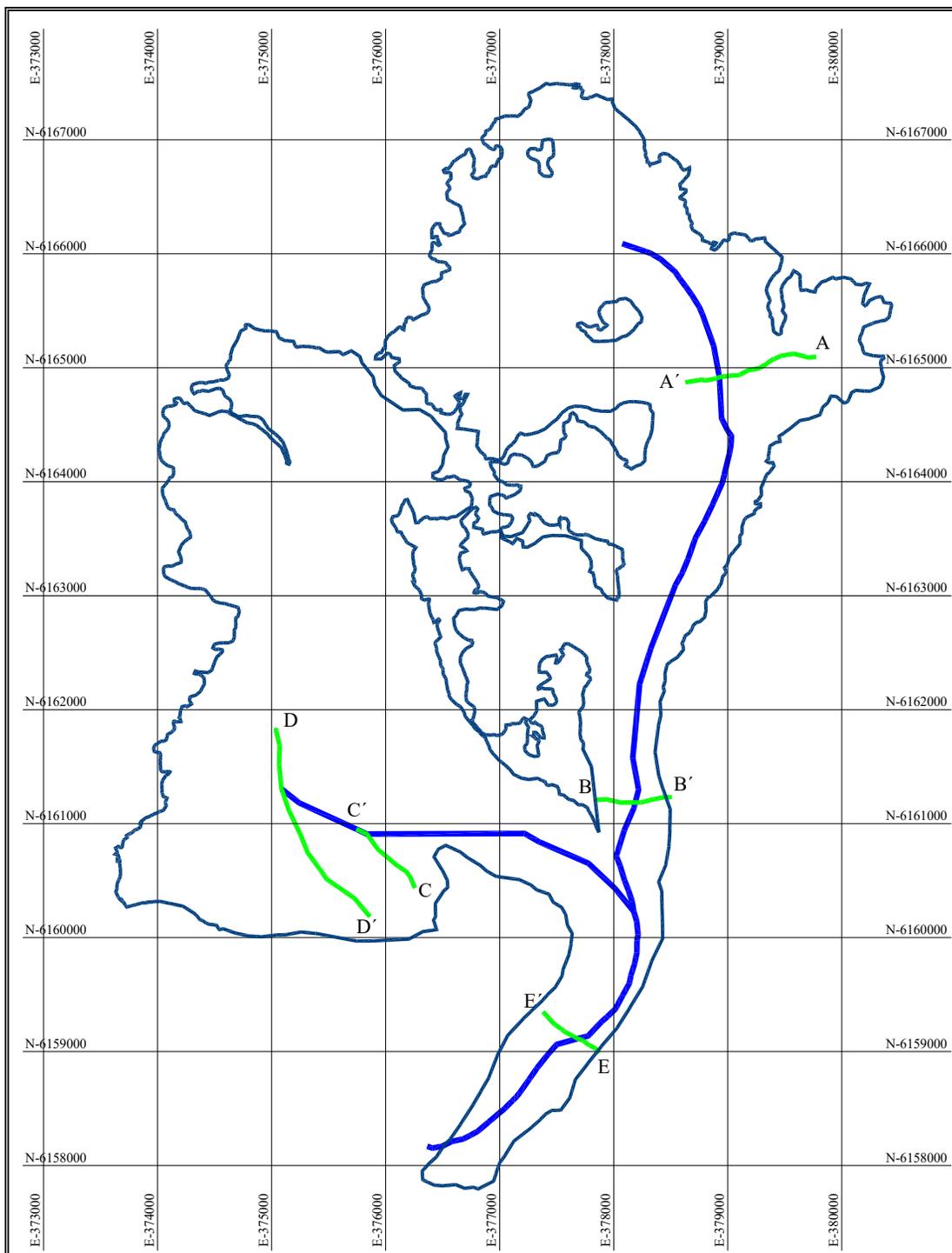
**Figura 4.4.5.3-A. Ascensión en la cuenca Norte del glaciar Universidad.**



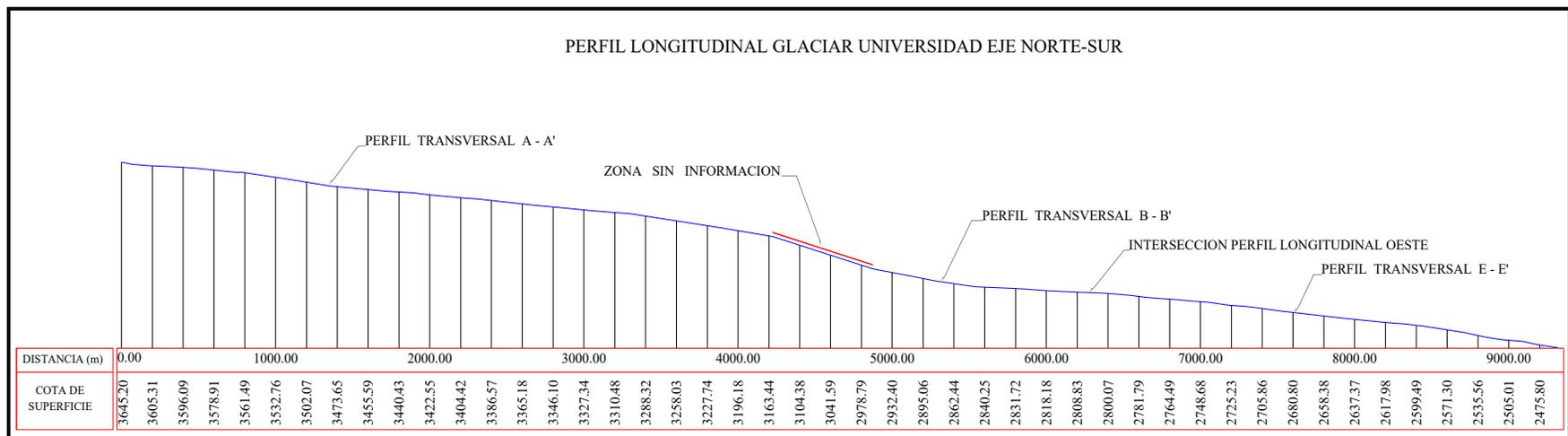
**Figura 4.4.5.3-B. Grieta junto a la ruta del eje longitudinal en la cuenca Oeste del glaciar Universidad.**

#### **4.4.5.4. Los resultados del levantamiento geodésico**

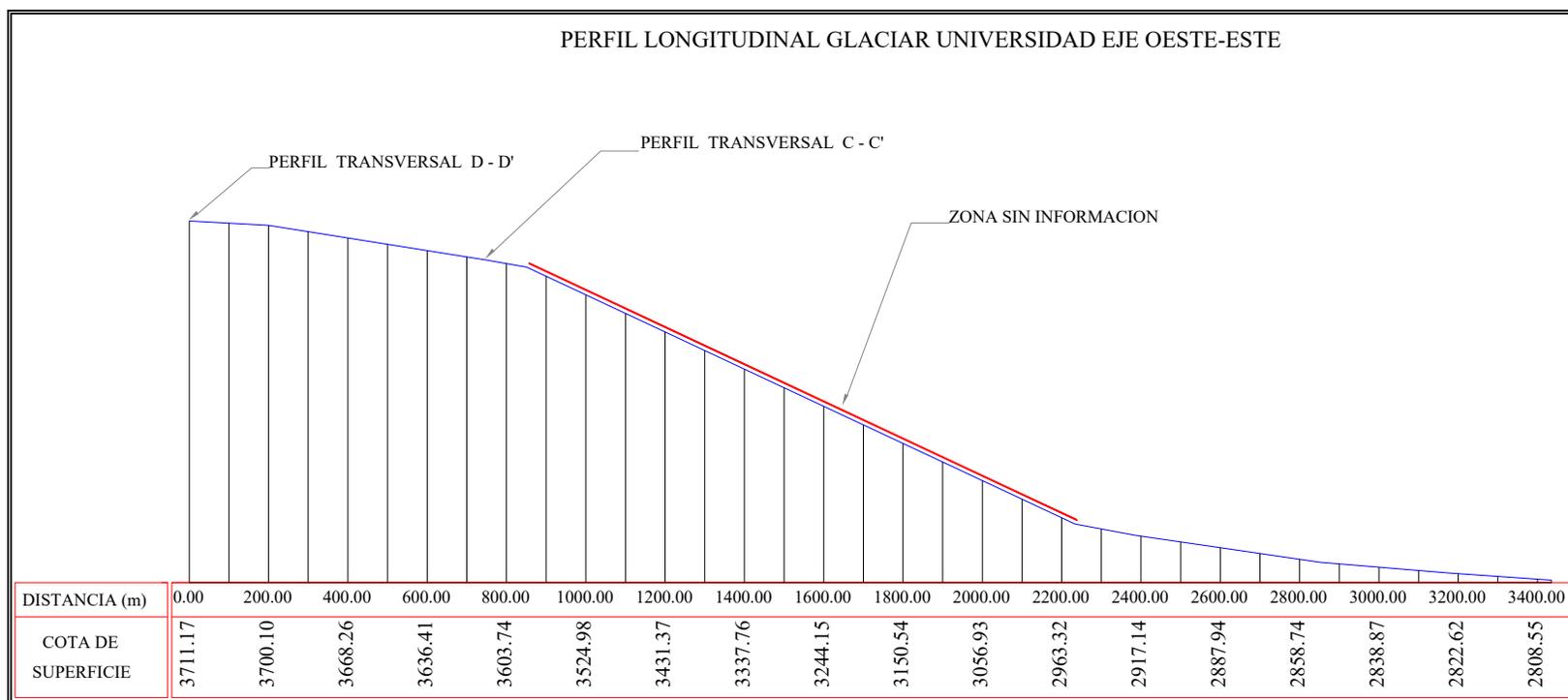
Los perfiles topográficos a lo largo de los ejes medidos (Figura 4.4.5.4-A) se muestran en las figuras 4.4.5.4-B a 4.4.5.4-H. Los datos de coordenadas y cotas de los puntos en los ejes recorridos y medidos, se incluyen en el Anexo F (Anexo F-A con modelo geoidal y Anexo F-B sin modelo geoidal).



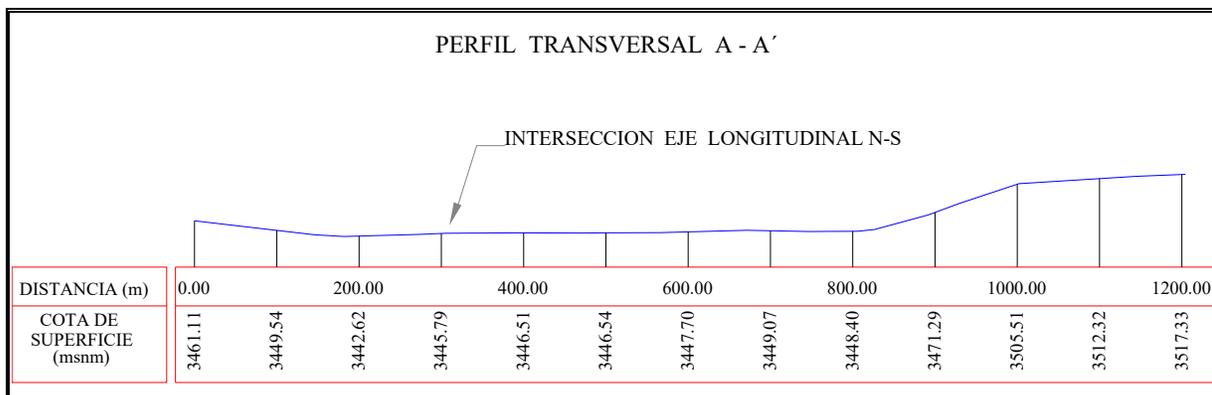
**Figura 4.4.5.4-A. Ubicación de los perfiles geodésicos realizados en el glaciar Universidad; en azul perfiles longitudinales y en verde los perfiles transversales.**



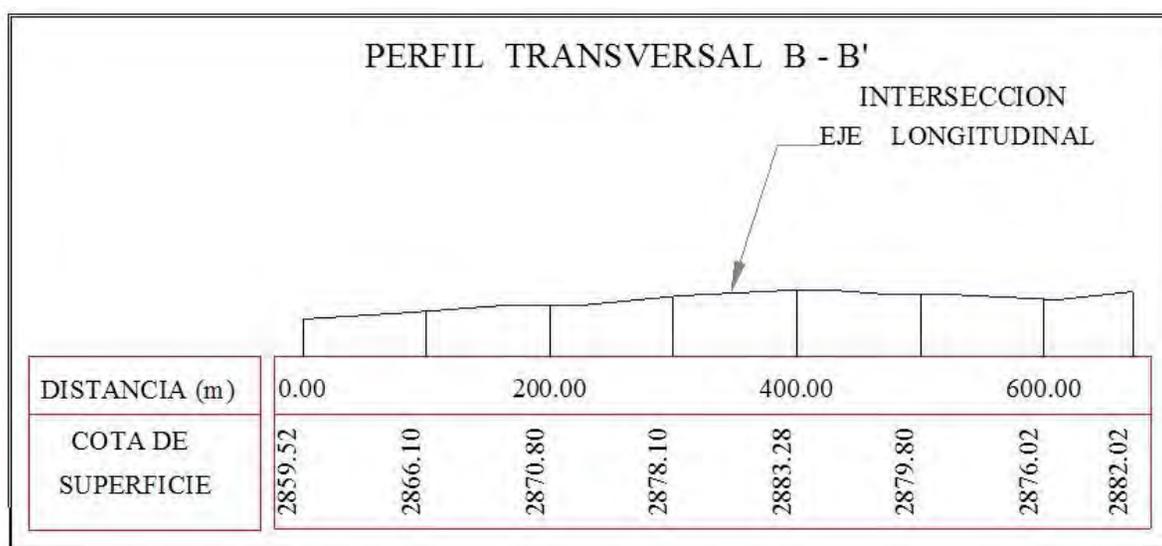
**Figura 4.4.5.4-B. Perfil longitudinal por el eje Norte-Sur del glaciar. Ver posición del eje en la Figura 4.4.5.4-A.**



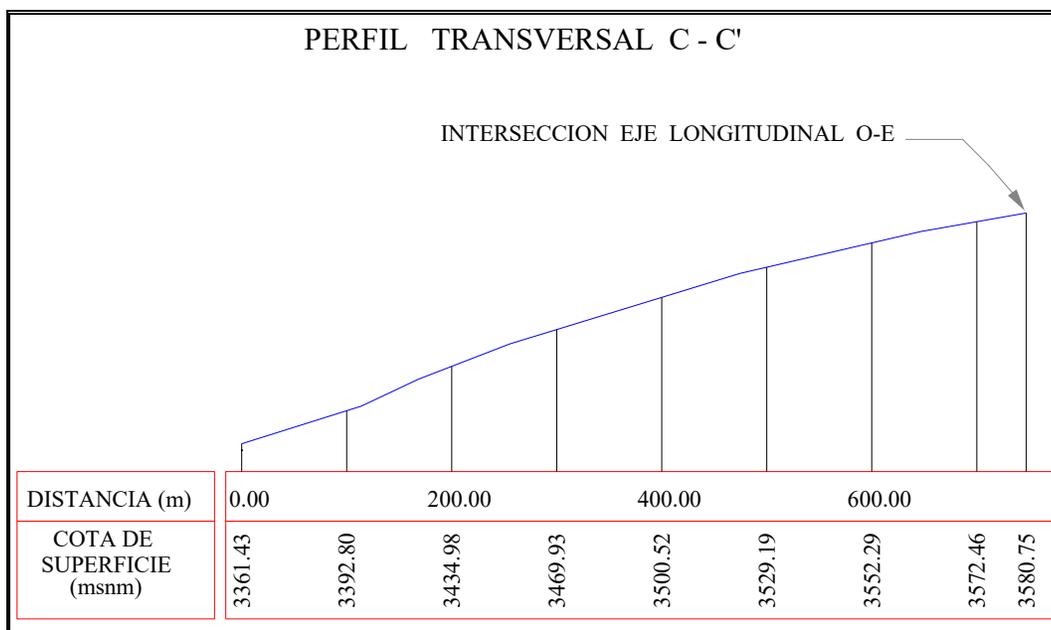
**Figura 4.4.5.4-C. Perfil longitudinal por el eje de la cuenca Oeste del glaciar Universidad. Ver posición del eje en Figura 4.4.5.4-A. La zona sin información corresponde a una cascada de hielo, con seracs y abundantes grietas, que hacen difícil y peligroso el tránsito en el sector.**



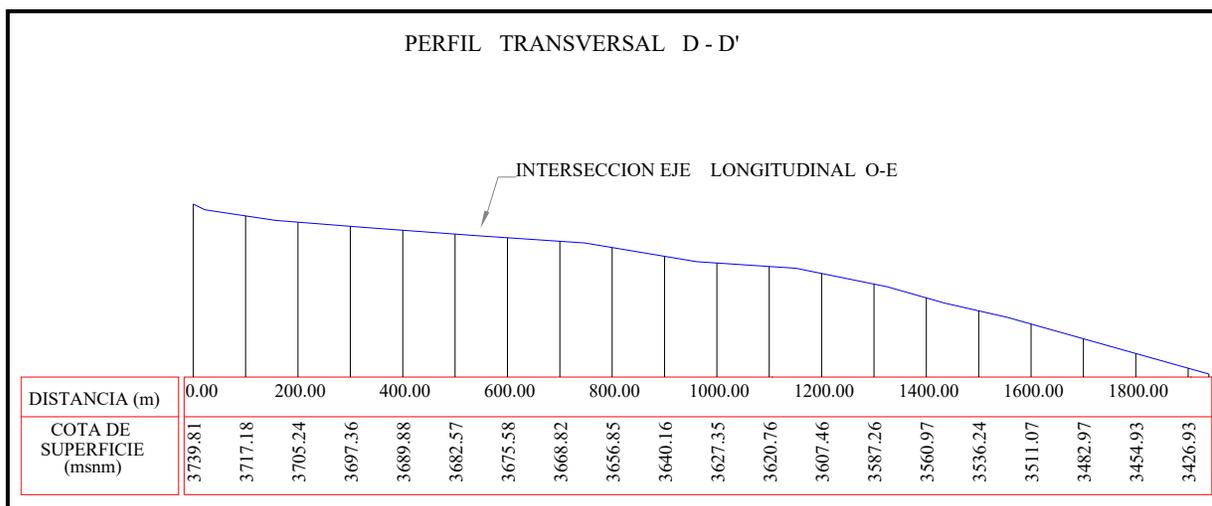
**Figura 4.4.5.4-D. Perfil transversal A-A' (ver ubicación en Figura 4.4.5.4-A) en la cuenca Norte, Zona de Acumulación, del glaciar Universidad; perfil de orientación general Este-Oeste.**



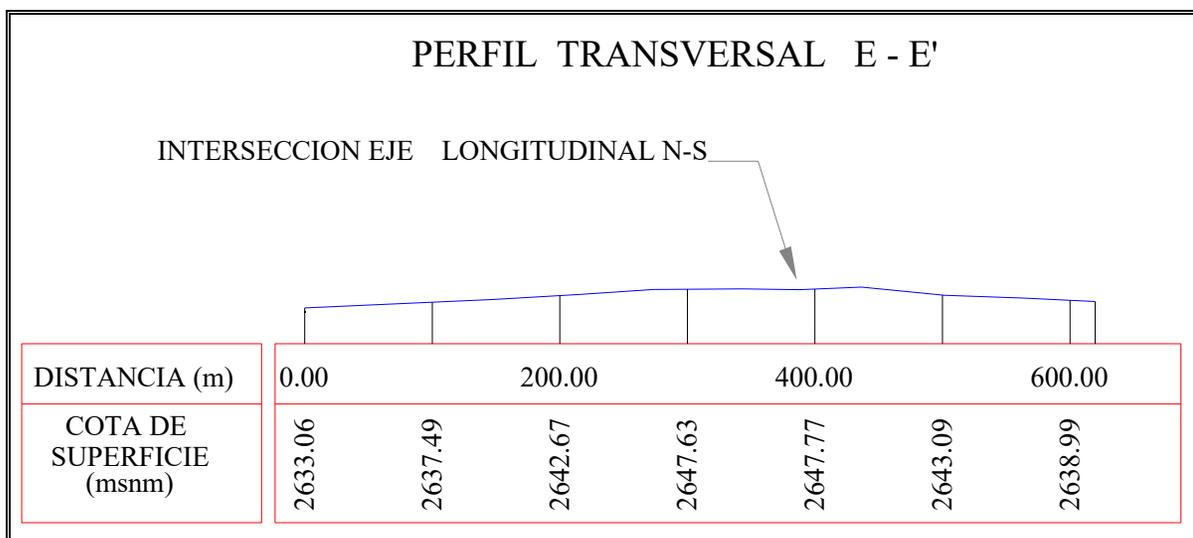
**Figura 4.4.5.4-E. Perfil transversal B-B' (ver ubicación en Figura 4.4.5.4-A), en el área de descarga de la cuenca Norte del glaciar Universidad, algo por debajo de la Línea e Equilibrio del glaciar en el sector. Perfil de orientación general Este - Oeste.**



**Figura 4.4.5.4-F. Perfil transversal C-C', ubicado en la cuenca Oeste del glaciar Universidad (Figura 4.4.5.4-A), Zona de Acumulación. La orientación general del perfil es de Noroeste a Sureste.**



**Figura 4.4.5.4-G. Perfil transversal D-D', por la cabeza de la cuenca Oeste del glaciar (ver ubicación en Figura 4.4.5.4-A), Zona de acumulación. La orientación general del perfil es, aproximadamente, Norte - Sur.**



**Figura 4.4.5.4-H. Perfil transversal E-E', ubicado en la lengua terminal del glaciar Universidad, Zona de Ablación (ver ubicación en Figura 4.4.5.4-A). La orientación general del perfil es de Noroeste a Sureste.**

#### **4.5. OBSERVACIONES HIDROLÓGICAS DEL GLACIAR UNIVERSIDAD**

##### **4.5.1. La estación fluviométrica**

Al comenzar las visitas al terreno, a mediados de Noviembre de 2010, la estación fluviométrica que registra el flujo de agua emergente de la pequeña laguna proglacial en el frente del glaciar Universidad (Figuras 4.5.1.1-A y 4.5.1.1-B), se encontró en claro estado de deterioro (Figura 4.5.1.1-C) debido a las variaciones del caudal del río, que al crecer con los deshielos de primavera desborda sobre la base de hormigón de la caseta del logger, removiendo el terreno y provocando la desestabilización de la estructura completa de la caseta.

También la regleta había sufrido los embates provocados por variaciones del caudal. Se encuentra ésta igualmente inclinada. Se estima que probablemente lo más acertado sería desinstalar estos equipos antes de que nuevas crecidas los destruyan parcial o totalmente.

Respecto al emplazamiento de la estación, se ha observado que el terreno en que se emplaza está compuesto de gravas y arenas, con escasos finos. Este es un suelo de tipo no cohesivo y la permeabilidad del mismo puede estimarse como alta, probablemente del orden de  $10^{-3}$  cm/s, o aún mayor (Berkman, 1989), inadecuada para lograr estimar los

caudales emergentes de la cuenca con una cierta precisión, puesto que debe existir en el entorno de la estación un importante escurrimiento subterráneo.



**Figura 4.5.1.1-A. Ubicación de la estación de aforo en relación al glaciar Universidad; en imagen satelital Google Earth.**



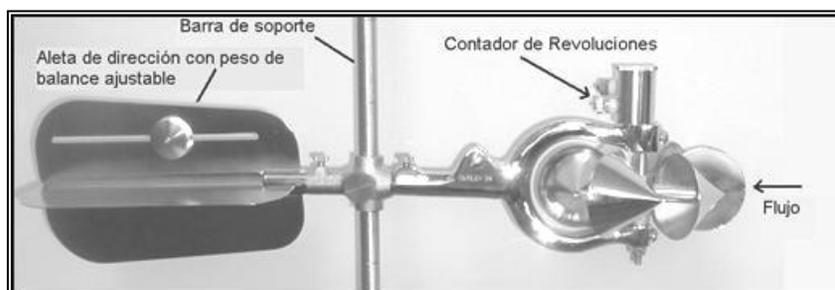
**Figura 4.5.1.1-B. Ubicación de la estación de aforo y laguna proglacial en el frente del glaciar Universidad; en imagen satelital Google Earth.**



**Figura 4.5.1.1-C. Condición en que se encontró la estación fluviométrica instalada el 17 de Noviembre de 2010. Vista hacia el Sureste.**

#### **4.5.2. Aforos en el cauce del río**

En vista del deteriorado estado de la estación fluviométrica automática instalada en el lugar (ver sub-capítulo anterior), se consideró la posibilidad de efectuar aforos en forma manual, utilizando para este propósito un molinete Gurley (Figura 4.5.2-A).



**Figura 4.5.2-A. Molinete tipo Gurley, utilizado en el aforo del caudal que descarga de la laguna proglacial del glaciar Universidad.**

El aforo con el molinete Gurley se efectuó el día 14 de Diciembre del 2010 a las 18:40 hrs., en un punto unos 10 m aguas arriba del lugar donde se encuentra ubicada la estación fluviométrica. La operación fue bastante delicada debido a la fuerza del caudal en esa época. Los técnicos debieron asegurarse debidamente con cuerdas y arneses para poder ingresar al río y llevar a cabo las mediciones.

Para la medición con molinete Gurley se midió el ancho del cauce y se dividió este en 10 abscisas, en cada una de las cuales se tomó una medición de profundidad, y finalmente la medición de caudal. El molinete registra el número de vueltas que impone el efecto dinámico del agua, y se relaciona esta frecuencia de giro con la velocidad del caudal. La planilla de resultado del aforo con molinete se muestra en la figura 4.5.2-B. El resultado del aforo indica un caudal de 6,52 m<sup>3</sup>/s.

ESTACIÓN : <b>Evacuación Gl. Universidad</b>						
ALTITUD M.S.N.M. :						
COORDENADAS U.T.M. :						
FECHA AFORO :	14-12-2010	18:40				
ALTURA LM MEDIA :	0,92	M				
CAUDAL :	6,5202	M <sup>3</sup> /S				
VELOCIDAD MEDIA :	1,0748	M/S				
PROFUNDIDAD MEDIA :	0,2250	M				
AREA SECCIÓN :	4,0275	M <sup>2</sup>				
PERÍMETRO MOJADO :	11,63729	M				
RADIO HIDRÁULICO :	0,3460857	M				
FACTOR HIDRÁULICO DE MANNING :	3,2611053	Q/ (AR <sup>**</sup> (2/3))				
FACTOR HIDRÁULICO DE CHEZY :	2,7519098	Q/ (AR <sup>**</sup> (1/2))				
ABSCISAS M	Tramo Vertical	Profundidad Total de Observ	Velocidad Vertical	Caudal Vertical	M <sup>3</sup> /S Acum	% TOTAL
0,00	0,25	0,05	0,3774	0,005	0,005	0,07
0,50	0,85	0,18	0,6290	0,068	0,073	1,11
1,20	1,80	0,22	0,8840	0,185	0,257	3,95
2,40	3,00	0,48	1,4450	0,832	1,090	16,71
3,60	4,20	0,52	1,6585	1,035	2,125	32,59
4,80	5,40	0,58	1,8244	1,270	3,394	52,06
6,00	6,60	0,57	1,7000	1,163	4,557	69,89
7,20	7,80	0,53	1,6585	1,055	5,612	86,07
8,40	9,00	0,45	0,8293	0,448	6,060	92,94
9,60	10,30	0,24	1,2439	0,388	6,448	98,89
11,00	11,25	0,18	0,4048	0,069	6,517	99,95
11,50	11,50	0,05	0,2429	0,003	6,520	100,00

Observaciones : Perdidas 25 L/seg (4/8)

**Figura 4.5.2-B. Planilla de resultados de aforo con molinete en el río que descarga la laguna proglacial del frente del glaciar Universidad.**

El procedimiento de aforo con molinete resultó ser demasiado peligroso y complejo para repetirlo con el alto nivel de agua encontrado, por lo que se tomó la determinación de suspender esta actividad, remplazándola por un registro fotográfico periódico del nivel del agua en la regleta.

La decisión de no repetir el aforo con molinete fue acertada, puesto que el caudal permaneció alto y, más entrada la estación veraniega, aumentó y se mantuvo alto durante Febrero para bajar recién a fines de Marzo.

La información obtenida de la observación del nivel de la superficie del agua en la regleta se muestra en la tabla 4.5.2-A, en la que se agrega el resultado del aforo con molinete.

**Tabla 4.5.2-A. Resultados de las observaciones de nivel de agua en la regleta inclinada de los restos de la estación de aforo en el río que descarga la laguna pro glacial del frente del glaciar Universidad.**

Fecha	Nivel (cm)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Foto	Hora	Observaciones
17-11-2010	84		Si	10:16	
09-12-2010	95		Si	17:36	
14-12-2011	92	6,52	No Disp.	18:40	Medido con instrumento
28-01-2010	130		No Disp.	17:00	
02-03-2011	115		Si	11:12	
25-03-2011	78		Si	11:08	
16-04-2011	73		Si	13:35	

### **4.5.3. Estimación del balance hídrico**

#### **4.5.3.1. La precipitación**

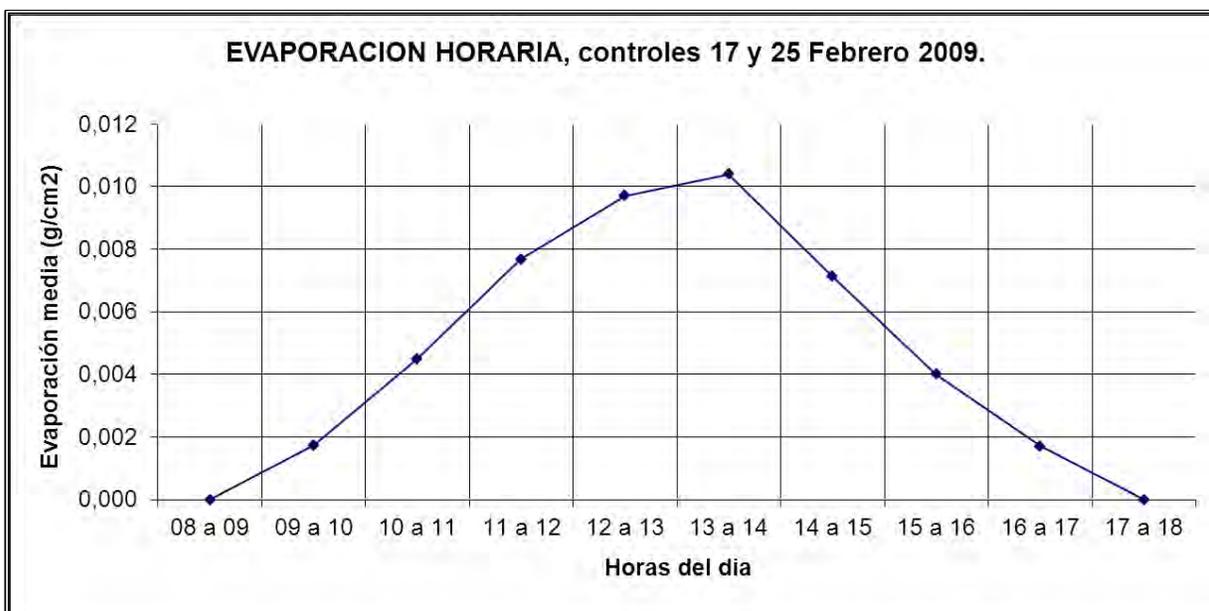
En el caso del glaciar Universidad, no existe registro de precipitaciones (la estación meteorológica automática no cuenta con el sensor para ello), pero durante la campaña de terreno, el 11 de Diciembre de 2010, se observó una leve precipitación nival sobre el glaciar. En esa fecha se acumuló aproximadamente 5 cm de nieve húmeda. Suponiendo una densidad del orden de 0,1 g/cm<sup>3</sup> para esta nieve húmeda, la precipitación mencionada equivale a aproximadamente 0,5 mm de agua.

#### **4.5.3.2. La evaporación**

Las condiciones en el glaciar Universidad durante el período de las campañas en terreno eran tales que fue propicia la ocurrencia de evaporación. La evaporación desde la superficie de un glaciar puede estimarse empleando ecuaciones del balance calórico, o medirse con instrumentos. No ha sido posible establecer el balance calórico en el glaciar debido a desperfectos en la estación meteorológica automática, con la cual se esperaba estimar la evaporación, por lo cual tampoco se estimó medir este parámetro.

No existe un antecedente de evaporación en el glaciar Universidad. Sólo se puede indicar

que, en trabajos sobre glaciares de la cordillera del centro de Chile, a la cota aproximada de 4.200 m, realizados por Geoestudios para sus clientes y por lo mismo no publicados, la evaporación es como se muestra en las figuras 4.5.3.2-A. Estos antecedentes, que probablemente no difieren mayormente de lo que podría ocurrir en el glaciar Universidad, indican que la evaporación diaria (en días soleados como lo fueron durante la campaña de terreno), debió haber sido cercana a 0,01 mm/día.



**Figura 4.5.3.2-A. Evaporación medida en Febrero en un campo de penitentes en un glaciar de la cordillera del centro de Chile a la cota de 4.200 m.**

#### 4.5.3.3. Escorrentía

Como se indicó en el capítulo 4.5.1, no fue posible realizar aforos programados en la estación fluviométrica que se suponía se encontraría aguas abajo del frente del glaciar Universidad, ya que esta había sufrido serios daños.

Un solo aforo realizado el día 14 de Diciembre de 2010 a las 18:40 hrs., indicó un caudal de 6,52 m<sup>3</sup>/s (ver capítulo 4.5.2). Otros aforos no se pudieron realizar por lo peligroso del cauce con caudales más altos.

Como resultado de lo anterior, no se conoce la variación de niveles, tampoco la curva de descarga, de manera que no se puede inferir caudales.

Solamente se puede agregar lo que se señala al final del capítulo 4.4.3 respecto al balance de masa del glaciar, en cuanto a que durante el período de controles, de

Diciembre de 2010 a Marzo de 2011 la pérdida de masa del glaciar representa un aporte hídrico como caudal medio constante en el período, de 4,77 m<sup>3</sup>/s.

#### **4.5.3.4. Congelamiento de agua a hielo**

Durante todo el período de las campañas realizadas en el glaciar, no existieron condiciones propicias para que ocurra congelamiento de agua a hielo. Pudo haber ocurrido algo así en las cotas más elevadas del glaciar, pero si ocurrió, sus montos son insignificantes.

No es inusual en glaciares templados, observar ocasionales grietas rellenas con agua, pequeñas lagunas supra-glaciales, incluso pequeños cursos de agua sobre el glaciar que se pierden en molinos o escurren hacia los márgenes del glaciar. Ninguno de estos fenómenos fue observado en el glaciar Universidad, el cual, por su propia característica de glaciar templado, y permeable. Parece no existir otro almacenamiento de agua más que el que ocurre como agua en pequeñas burbujas atrapadas en los cristales de hielo.

#### **4.5.3.5. El cambio en el total de la masa de agua – balance hídrico**

Como se indicó en el capítulo 4.5.3.3, no fue posible evaluar la escorrentía en la estación fluviométrica, de manera que no se cuenta con antecedentes del aporte más relevante al balance hídrico del glaciar. El resto de los aportes, como aquellos de la precipitación, evaporación y el congelamiento de agua, y tal como se indica en los sub-capítulos previos tiene escaso significado en el balance hídrico del glaciar.

### **4.6. EL BALANCE DE ENERGÍA SUPERFICIAL DEL GLACIAR**

#### **4.6.1. La estación meteorológica automática**

##### **4.6.1.1. Instalación de la estación meteorológica**

Durante la primera campaña al glaciar se procedió al transporte e instalación de la estación meteorológica automática en el glaciar Universidad. Su ubicación se definió como aquella de un lugar cercano a la posible ubicación de la Línea de Equilibrio del glaciar, y considerando las facilidades de acceso para su mantenimiento. En la figura 4.6.1.1-A se aprecia el lugar de emplazamiento. La estación no se instaló en la línea de equilibrio propiamente tal, sino en la zona de ablación del glaciar.

Las coordenadas en UTM de la estación meteorológica automática son:

378124.86 N

6161034.12 E

Para la instalación de la estación se realizaron cuatro perforaciones en el hielo, en las cuales se insertaron postes de pino impregnado, uno de ellos de 3 m de largo para apoyar el mástil de la estación sobre este, y tres más de 2,5 metros de largo cada uno para fijar los tensores de anclaje del mástil.

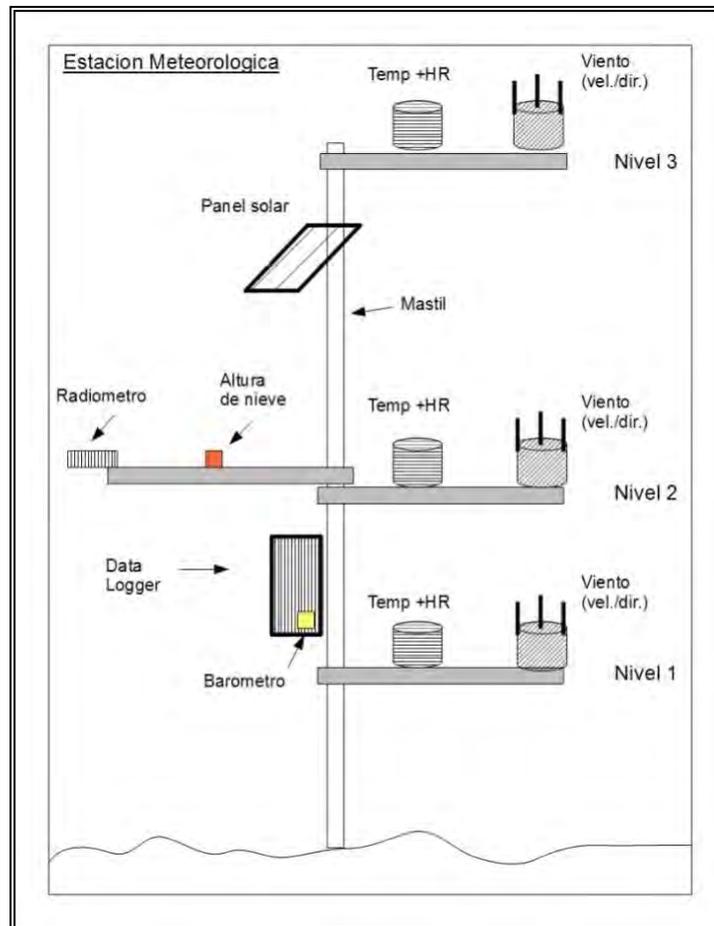


**Figura 4.6.1.1-A. Ubicación del lugar donde se instaló la estación meteorológica en el glaciar Universidad, vista en una imagen Google Earth.**

Tras lo anterior se procedió al armado del mástil, instalación de instrumentos, fijación del logger y conexión de las baterías, para terminar con la instalación.

El día 10 de Diciembre a las 16:00 hrs. se completó la instalación de la estación sobre el glaciar. A partir de ese momento la estación meteorológica comenzó a funcionar y recopilar información.

En la figura 4.6.1.1-B se observa la distribución de los sensores, de la placa solar y del "data logger" en el mástil de la estación.



**Figura 4.6.1.1-B. Ubicación de los componentes de la estación meteorológica automática, en el mástil de instalación.**

La cronología de actividades de instalación, puesta en marcha y funcionamiento de la estación meteorológica automática se detalla a continuación.

- El día 9 de Diciembre se completa la instalación en terreno y se deja funcionando.
- El día 15 de Diciembre se le conecta un computador portátil para comprobar su funcionamiento, se detecta y corrige ajustes en la conexión de los sensores más bajos. Se percibe que algunos de los datos que registra el sensor de radiación no son válidos, y no se logra determinar la posición correcta de los conectores debido a que no cuentan con una identificación. Se informó esta situación a la UGN, la cual aconsejó derivar al técnico de Metcom. La estación se armó completamente en las dependencias de Geostudios, asistidos por el técnico de Metcom, quien no puede dar respuesta sobre la posición correcta de los conectores.

- El día 21 de Diciembre, habiendo intentado infructuosamente asegurar el correcto funcionamiento del sensor de radiación, se decidió retirar el Data Logger y sensor de radiación para entregarlos al técnico de Metcom, quien los mantuvo en pruebas para comprobar su funcionamiento durante la última semana de Diciembre.
- El día 03 de Enero se recupera el Data Logger y radiómetro desde las oficinas de Metcom, con el sensor de radiación supuestamente corregido, y se recibe información aparentemente precisa respecto de las conexiones de los cables al sensor de radiación. El técnico de Metcom nos informa, además, sobre la **programación de grabado de datos en memoria "interna", por periodos de hasta 30 días**. Cuando se detectó el problema se le comunicó a la persona que nos entregó la estación y se actuó de común acuerdo.
- El día 17 de Enero se instaló nuevamente el Data Logger y el sensor de radiación en el mástil de la estación en el glaciar; se conectaron los demás sensores y se comprobó su funcionamiento en terreno, conectándose a través de cable con un notebook para verificar los registros. Los registros se produjeron, pero la exactitud de estos registros no se pudo comprobar.
- El día 23 de Marzo se corrige la altura de los sensores (debido a la ablación de la superficie del glaciar), bajándolos, se descargan los datos guardados en la memoria externa hasta la fecha, descubriéndose que solo había datos de los últimos 30 días en la tarjeta. Aparentemente, esto ocurrió porque el logger estaba programado para sobre-escribir los datos recolectados en la memoria externa, después de un período de 30 días, lo cual no fue informado por parte del técnico. Esto fue informado al inspector fiscal en su debido momento.
- El día 15 de Abril se desmonta y retira la estación desde el glaciar. Al extraer los datos de la tarjeta de memoria se comprueba nuevamente que esta contenía información de los últimos 30 días, es decir entre el 16 de Marzo y el 15 de Abril.

Como consecuencia de todo lo anterior, se concluye lo que sigue:

- Aparentemente, y según informó el técnico de Metcom, la estación se re-programó mientras estuvo en sus oficina, para que almacene datos solamente

durante los últimos 30 días, ello a pesar de la gran capacidad de almacenaje de datos de la memoria.

- No se informó al personal de Geoestudios de esta re-programación de la memoria y de la necesidad que eso implicaba, en cuanto a tener que bajar datos cada 30 días.
- Solo se tuvo conocimiento del problema de sobre-escritura de datos el día 23 de Marzo de 2011, al intentar bajar datos en terreno.
- Como consecuencia de lo anterior, existen datos entre el 15 y el 21 de Diciembre de 2010, pero incompletos debido al problema en los sensores del nivel más bajo y del sensor de radiación, y existen datos completos pero que evidencian errores, al menos en el sensor de radiación, entre el 24 de Febrero y el 23 de Marzo, y entre el 24 de Marzo y el 14 de Abril de 2011, fecha en que se desmontó la estación.

La figura 4.6.1.1-C, muestra la estación meteorológica automática. Esta estación fue reinstalada en tres ocasiones (17.01.2011, 14.02.2011 y 02.03.2011). En las ocasiones en que fue reinstalada para corregir (bajar) la altura de los sensores por sobre la superficie del glaciar, de manera que la altura de estos sobre la superficie se mantuviera en rangos relativamente homogéneos. Esto se realizó re-perforando los agujeros de los postes en que se apoyaron tanto el mástil de la estación como los amarres de los tensores (o cables de anclaje) del mástil.



**Figura 4.6.1.1-C. La estación meteorológica automática instalada el día 10-12-2010. Primera fecha de instalación.**

La distribución de sensores en la estación meteorológica automática instalada en el glaciar Universidad es como se muestra en la tabla 4.6.1.1-A. La figura 4.6.1.1-D muestra una fracción de la planilla de datos bajados de la estación.

**Tabla 4.6.1.1-A. Distribución de sensores en la estación meteorológica automática en el glaciar Universidad. La altura de los sensores sobre el hielo es aquella medida en el momento de la instalación.**

Altura sobre el hielo (cm)	Estructura en que se inserta el sensor o instrumento	Sensores	Modelo	Rango	Resolución	Precisión
80 cm	Primer brazo de instrumentos	Temperatura	HMP 145	- 80° a + 60°C	0,01 °C	± 0,22°C
		Humedad Relativa		0-100%	0,1%	± 1
		Viento	WMT52	0-60 m/s	± 0,1 m/s	± 0,3 m/s
155 cm	Data Logger	Presión Ambiental	PMT16A			
230 cm	Segundo brazo	Temperatura	HMP 145	- 80° a +	0,01 °C	± 0,22°C

Altura sobre el hielo (cm)	Estructura en que se inserta el sensor o instrumento	Sensores	Modelo	Rango	Resolución	Precisión
	de instrumentos			60°C		
		Humedad Relativa		0-100%	0,1%	± 1
		Viento	WMT52	0-60 m/s	± 0,1 m/s	± 0,3 m/s
230 cm	Brazo radiómetro	Radiación	QMN101			
		Altura de nieve	IRU-9429S			
430 cm	Tercer brazo de instrumentos	Temperatura	HMP 145	- 80° a + 60°C	0,01 °C	± 0,22°C
		Humedad Relativa		0-100%	0,1%	± 1
		Viento	WMT52	0-60 m/s	± 0,1 m/s	± 0,3 m/s

date	time	status	TA05_Stat10m		RH05_Stat10m		DP05_Stat10m		TA2_Stat10m				
			Avg	Avg/hora	Avg	Avg/hora	Avg	Avg/hora	Avg	Avg/hora			
12-01-2010	0:00:05	VALID	18,141	17,453	VALID	48,197	50,075	VALID	7,003	6,925	VALID	18,036	17,353
12-01-2010	1:00:05	VALID	15,994	16,222	VALID	55,469	54,675	VALID	7,066	7,063	VALID	15,636	15,990
12-01-2010	2:00:05	VALID	13,837	14,084	VALID	63,104	62,922	VALID	6,918	7,112	VALID	13,566	13,774
12-01-2010	3:00:05	VALID	12,613	12,643	VALID	67,262	67,437	VALID	6,688	6,756	VALID	12,278	12,320
12-01-2010	4:00:05	VALID	11,093	11,179	VALID	76,526	76,164	VALID	7,130	7,131	VALID	10,705	10,803
12-01-2010	5:00:05	VALID	10,145	10,273	VALID	80,271	79,994	VALID	6,895	6,967	VALID	9,741	9,817
12-01-2010	6:00:06	VALID	9,812	9,657	VALID	80,187	81,877	VALID	6,548	6,706	VALID	9,495	9,312
12-01-2010	7:00:06	VALID	8,755	8,774	VALID	85,884	86,077	VALID	6,522	6,571	VALID	8,385	8,423
12-01-2010	8:00:05	VALID	8,332	8,336	VALID	87,261	87,770	VALID	6,334	6,423	VALID	8,006	8,005
12-01-2010	9:00:06	VALID	8,705	8,811	VALID	84,259	84,244	VALID	6,188	6,275	VALID	8,222	8,395
12-01-2010	10:00:05	VALID	9,131	9,393	VALID	81,828	79,900	VALID	6,190	6,088	VALID	8,734	9,015
12-01-2010	11:00:05	VALID	12,444	11,962	VALID	65,920	68,320	VALID	6,270	6,297	VALID	12,429	11,877
12-01-2010	12:00:05	VALID	15,300	15,049	VALID	57,012	58,296	VALID	6,838	6,898	VALID	15,106	14,903
12-01-2010	13:00:05	VALID	17,494	17,427	VALID	51,147	51,543	VALID	7,284	7,317	VALID	17,218	17,145
12-01-2010	14:00:05	VALID	19,077	19,025	VALID	46,713	47,441	VALID	7,400	7,588	VALID	18,958	18,850
12-01-2010	15:00:05	VALID	20,782	20,431	VALID	45,904	46,345	VALID	8,706	8,522	VALID	20,678	20,314
12-01-2010	16:00:05	VALID	22,155	22,166	VALID	42,050	42,222	VALID	8,654	8,718	VALID	22,026	21,945
12-01-2010	17:00:05	VALID	22,895	22,725	VALID	40,588	40,981	VALID	8,792	8,770	VALID	22,438	22,398
12-01-2010	18:00:06	VALID	23,316	23,475	VALID	36,898	37,391	VALID	7,789	8,090	VALID	23,041	23,252
12-01-2010	19:00:05	VALID	24,480	24,302	VALID	31,111	32,241	VALID	6,256	6,610	VALID	24,333	24,076
12-01-2010	20:00:05	VALID	24,343	24,396	VALID	23,172	25,258	VALID	1,981	3,121	VALID	23,911	23,971
12-01-2010	21:00:05	VALID	22,933	23,162	VALID	25,487	26,604	VALID	2,117	2,858	VALID	22,707	22,943
12-01-2010	22:00:05	VALID	21,579	21,779	VALID	30,610	29,541	VALID	3,513	3,190	VALID	21,398	21,588
12-01-2010	23:00:05	VALID	19,299	19,500	VALID	30,070	31,736	VALID	1,359	2,157	VALID	19,177	19,370

**Figura 4.6.1.1-D. Vista de una fracción de la planilla de datos obtenida de la Estación Meteorológica Automática instalada en el glaciar Universidad, en formato CSV.**

#### 4.6.1.2. Otros aspectos de la estación meteorológica automática

La estación meteorológica fue instalada a la cota de 2.860 m. Los sensores de temperatura, viento y humedad relativa se colocaron, agrupados en un mismo brazo, inicialmente, a las alturas que se indica:

- Sensor inferior a 80 cm de la superficie.

- Sensor medio a 230 cm de la superficie.
- Sensor alto a 430 cm de la superficie del glaciar.

Debido al continuo descenso de la superficie de nieve, fue necesario bajar la estación, estas bajadas se realizaron en las fechas y longitudes que se muestran a continuación:

- 17 de Enero de 2011, sin dato.
- 14 de Febrero de 2011, 205 cm.
- 2 de Marzo de 2011, 185 cm.

#### **4.6.2. Los registros en la Estación Meteorológica Automática en el glaciar**

##### **4.6.2.1. Aspectos generales de los registros meteorológicos observados**

El balance calórico, para el propósito del presente estudio, debió realizarse con antecedentes recolectados de una estación meteorológica automática proporcionada por la DGA, desde Diciembre 2010 a Abril 2011. Es común en los glaciares de la cordillera del centro de Chile que estos son meses con aportes calóricos positivos, y que pueden producir fusión del hielo glaciar.

La estación automática proporcionada por la DGA para ser instalada en el glaciar Universidad constó con los siguientes sensores meteorológicos:

- 3 sensores de viento, a ser instalados a diferentes alturas.
- 3 sensores de temperatura, a ser instalados a diferentes alturas.
- 3 sensores de humedad relativa, a ser instalados a diferentes alturas.
- Presión barométrica.
- Radiación onda corta incidente y reflejada.
- Radiación onda larga incidente y emitida.
- Sensor de altura de nieve.

El 9 de Diciembre de 2010 se instaló la estación meteorológica automática (AWS) en el glaciar Universidad, (capítulo 2.4.1.3.1), y comenzó con sus registros el 10 de Diciembre 2010, hasta la fecha de su desmontaje, el 15 de Abril 2011.

En Diciembre la estación meteorológica registro nueve días de parámetros, en el mes de Enero no se obtuvieron registros, y se registraron datos desde el 22 de Febrero hasta el día de su desinstalación.

En un análisis general, se observan datos inválidos y algunos registros sin datos, como por ejemplo, en el sensor de onda larga (ver datos de la estación meteorológica en el archivo digital). Tras el primer análisis de estos, se seleccionaron los registros con datos válidos que correspondieron principalmente en el lapso de tiempo entre el 22 de Febrero y 15 de Abril. Debido a problemas la configuración del almacenaje de datos registrados en la memoria "externa" (ver capítulo 4.6.1.1), no se recuperaron datos entre 17 de Enero y el 22 de Febrero, ya que estos fueron descargados el 23 de Marzo. En el mes de Diciembre solo se obtuvieron datos válidos de dos días.

#### **4.6.2.2. Parámetros meteorológicos registrados**

##### 4.6.2.2.1. Temperatura

Los datos observados de temperatura del aire, son significativamente altos.

El promedio de horas diarias de sol registradas en los días 16 y 19 de Diciembre, y entre 22 de Febrero al 15 de Abril, se muestran en la tabla 4.6.2.2.1-A.

**Tabla 4.6.2.2.1-A. Promedio de horas diarias de sol en el glaciar Universidad, registros en el sensor inferior de temperatura.**

	<b>DIC (2días)</b>	<b>FEB (7 días)</b>	<b>MAR (30 días)</b>	<b>ABR (15 días)</b>
<b>Med</b>	6,2	3,1	5,5	4,8
<b>Max</b>	9,1	10,6	11,7	12,2
<b>Min</b>	6,2	7,8	-3,9	-2,4

Como se muestra en la tabla 4.6.2.2.1-A valores promedios de temperatura en el glaciar Universidad a la cota de 2.860 m.s.n.m. correspondiente al periodo de estudio, muestran temperaturas relativamente altas, con una media de 4,9 °C.

Según los antecedentes meteorológicos, las mayores temperaturas ocurrieron a principios de la segunda semana de Abril, con una máxima de 12,2 °C registrada en el sensor inferior.

Para realizar el balance calórico es necesario la variación vertical de la temperatura del aire por sobre la superficie de nieve o hielo. Con los datos de temperatura a tres niveles en relación al sensor de altura.

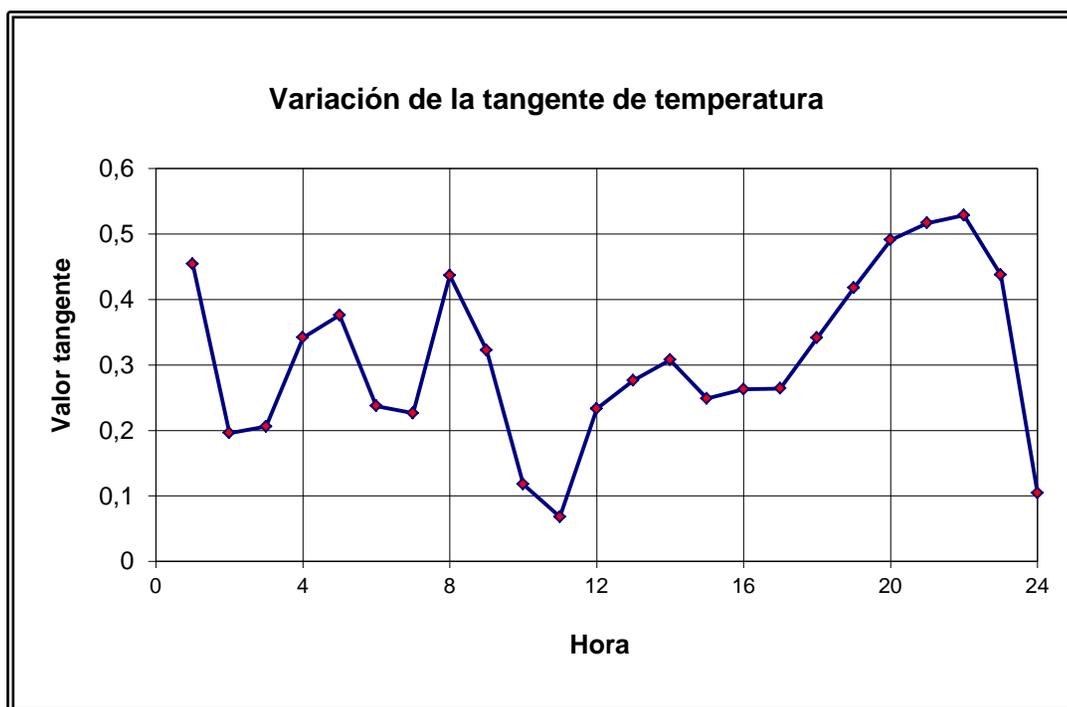
Considerando que el balance calórico se haría en períodos de 6 horas (de 00 a 06, de 06 a 12, de 12 a 18, de 18 a 24 horas) se calcularon las pendiente de la gradiente de temperatura a las 03, 09, 15, y 21 horas, para todos los días, pero con las alturas

iniciales de los sensores, y los ajustes de altura de los sensores.

Los valores de la pendiente de la ecuación de temperaturas resultantes, se muestra en la tabla 4.6.2.2.1-B, y en la figura 4.6.2.2.1-A la curva de la tangente de temperatura.

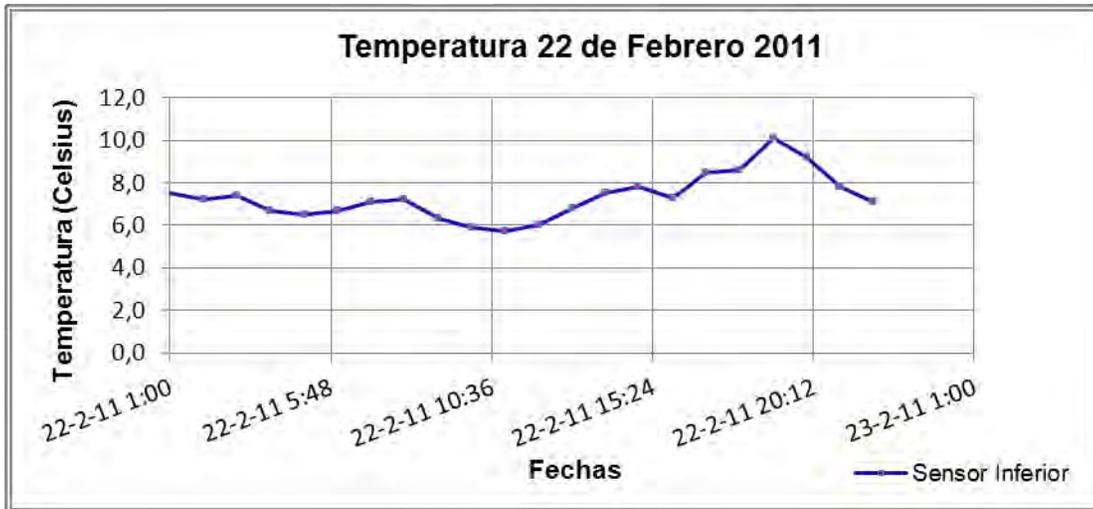
**Tabla 4.6.2.2.1-B. Pendiente ( $\tan \alpha$ ) promedio de la línea temperatura vs. log altura de sensores, y constante (kT) del perfil de temperatura, obtenido en la estación meteorológica del glaciar Universidad.**

	Hora de la observación			
	03:00	09:00	15:00	21:00
Tan $\alpha$	0,2059	0,3222	0,2486	0,5165

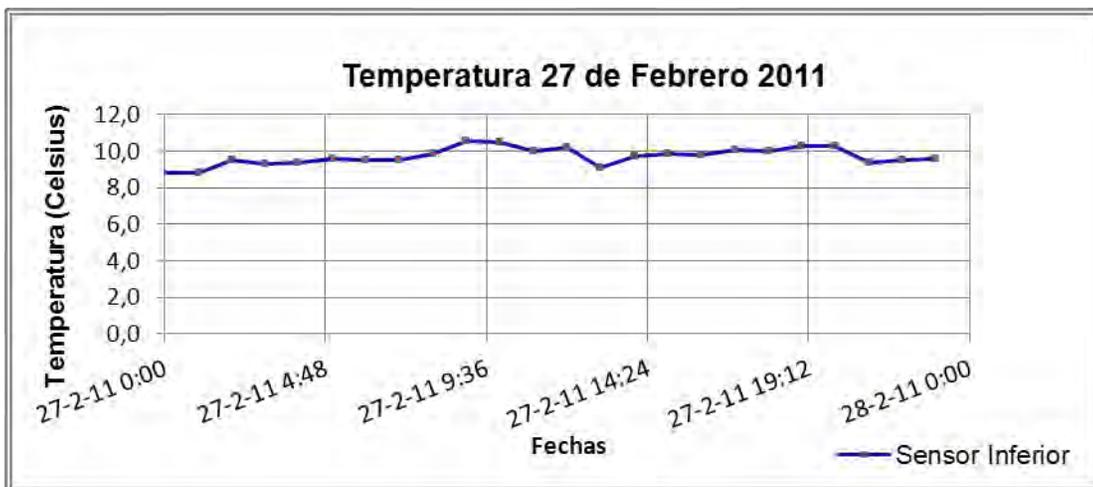


**Figura 4.6.2.2.1-A. Pendiente promedio de la línea de temperatura vs. Log altura de sensores, y constante del perfil de temperatura, para la estación meteorológica en el glaciar Universidad.**

En las figuras 4.6.2.2.1-B a 4.6.2.2.1-G, se muestran los registros de temperatura del aire, de días significativos, en periodos de 24 horas. Las temperaturas más altas se observan entre las 18:00 y las 23:00 horas.



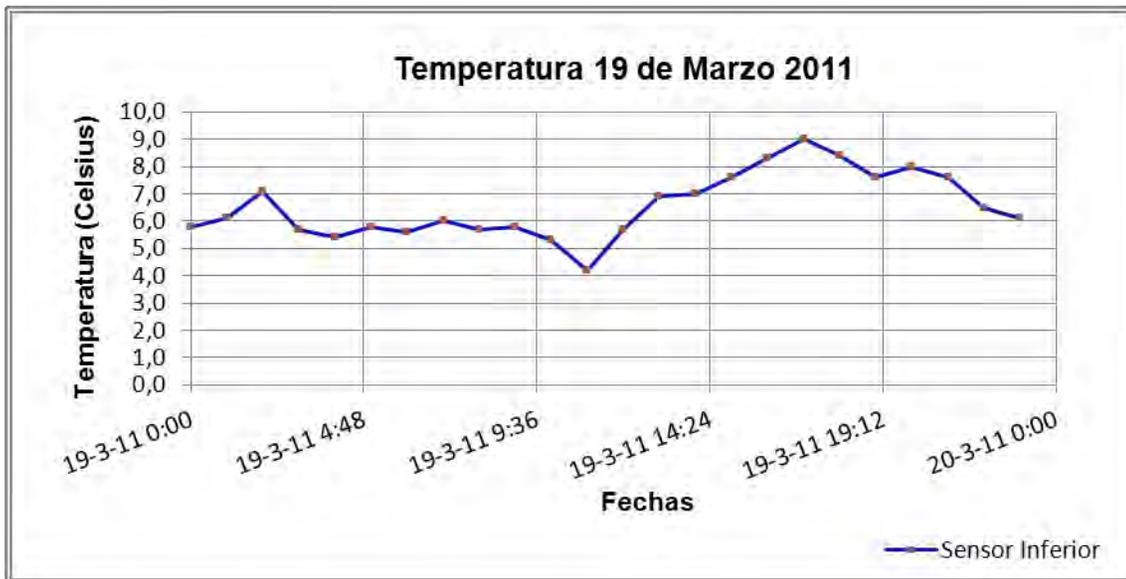
**Figura 4.6.2.2.1-B. Temperatura registrada en la estación meteorológica, el día 22 de Febrero en el glaciar Universidad.**



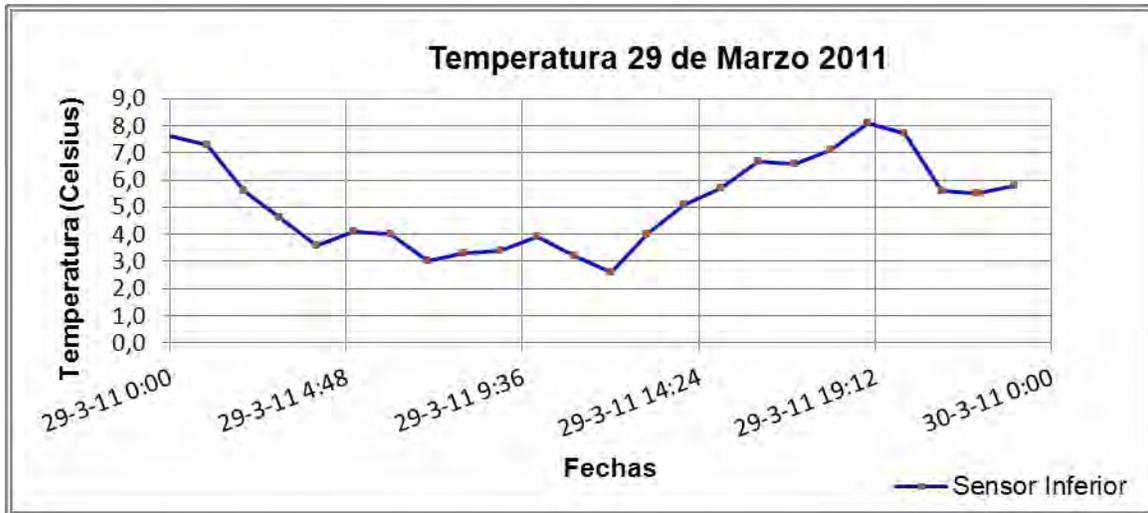
**Figura 4.6.2.2.1-C. Temperatura registrada en la estación meteorológica, el día 27 de Febrero en el glaciar Universidad.**



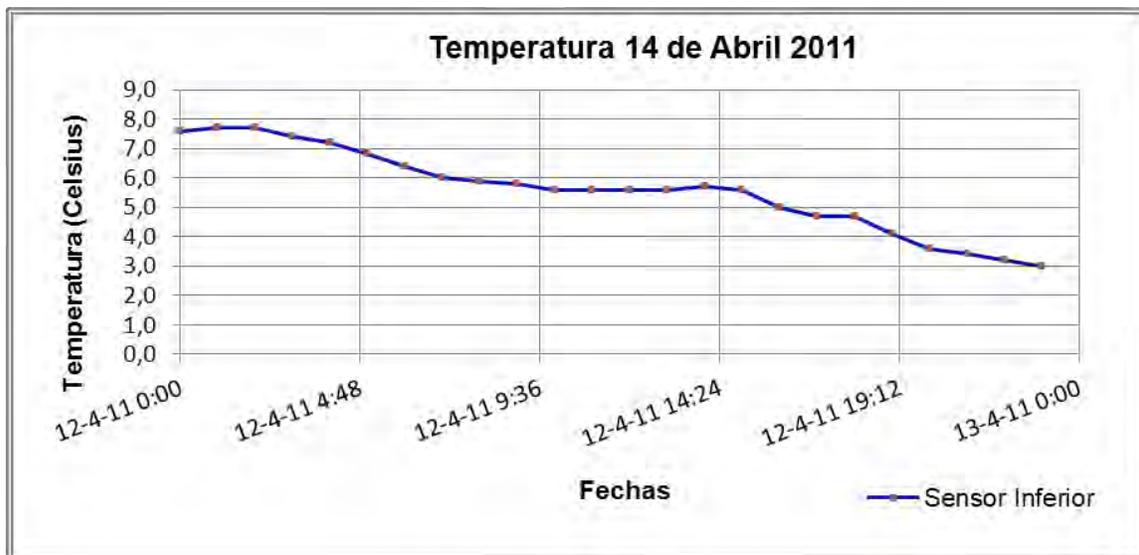
**Figura 4.6.2.2.1-D. Temperatura registrada en la estación meteorológica, el día 10 de Marzo en el glaciar Universidad.**



**Figura 4.6.2.2.1-E. Temperatura registrada en la estación meteorológica, el día 19 de Marzo en el glaciar Universidad.**



**Figura 4.6.2.2.1-F. Temperatura registrada en la estación meteorológica, el día 29 de Marzo en el glaciar Universidad.**



**Figura 4.6.2.2.1-G. Temperatura registrada en la estación meteorológica, el día 14 de Abril en el glaciar Universidad.**

#### 4.6.2.2.2. Precipitación

No existen registros de precipitación en el área del estudio.

Durante la campaña de terreno para el presente estudio, se observó un solo evento de precipitación, de carácter nival el día 11 de Diciembre 2010. Esta corresponde a un evento que acumulo 5 cm de nieve fresca de baja densidad (100kg/m<sup>3</sup>).

La nieve caída ha sido poco relevante y no alcanzó a persistir por más de cuatro días.

#### 4.6.2.2.3. Viento

Para evaluar el balance calórico, es de mayor importancia, conocer la variación del viento con la altura sobre el terreno (o sobre el glaciar). Con los datos de viento a tres niveles, se calculó la gradiente vertical del viento con la altura, empleando el sensor de altura sobre la superficie del glaciar para establecer la variación de la altura del sensor de viento sobre la superficie.

Los valores encontrados para la pendiente de la ecuación del viento, son como se muestran en la tabla 4.6.2.2.3-A.

**Tabla 4.6.2.2.3-A. Pendiente ( $\tan \alpha$ ) promedio de la línea velocidad de viento vs. Log altura de sensores, en una estación meteorológica en el glaciar Universidad.**

	Hora de la observación			
	03:00	09:00	15:00	21:00
Tan $\alpha$	0,6299	0,6600	0,2637	0,5035

La gradiente del viento parece debilitarse ante los ascensos de masas de aire cálidas que ocurren pasado el mediodía.

Los datos de viento registrados en la estación meteorológica, se observa una velocidad media de 4,3 m/s.

La dirección preponderante del viento ha sido desde el Norte y Noreste.

#### 4.6.2.2.4. Humedad relativa

La humedad relativa media observada es de un 44% en el glaciar Universidad a la cota 2.860 m.s.n.m., para el periodo entre los días 16 y 19 de Diciembre, y los días desde el 22 de Febrero al 15 de Abril.

En la tabla 4.6.2.2.4-A se muestran los promedios de humedad relativa, mínimas, medias y máximas registradas en la estación mete

orológica automática.

**Tabla 4.6.2.2.4-A. Humedad relativa (%) observada en el glaciar Universidad a cota de 2.860 m.s.n.m.**

HUMEDAD RELATIVA MAXIMA		
16 de Diciembre 2010	(1 día)	45,85

19 de Diciembre 2010	(1 día)	43,48
Desde 22 Febrero a 15 Abril 2011	(52 días)	94,12
<b>HUMEDAD RELATIVA MINIMA</b>		
16 de Diciembre 2010	(1 día)	21,96
19 de Diciembre 2010	(1 día)	22,34
Desde 22 Febrero a 15 Marzo 2011	(52 días)	14,60
<b>HUMEDAD RELATIVA MEDIA</b>		
16 de Diciembre 2010	(1 día)	32,47
19 de Diciembre 2010	(1 día)	28,31
Desde 22 Febrero a 15 Marzo 2011	(52 días)	44,14

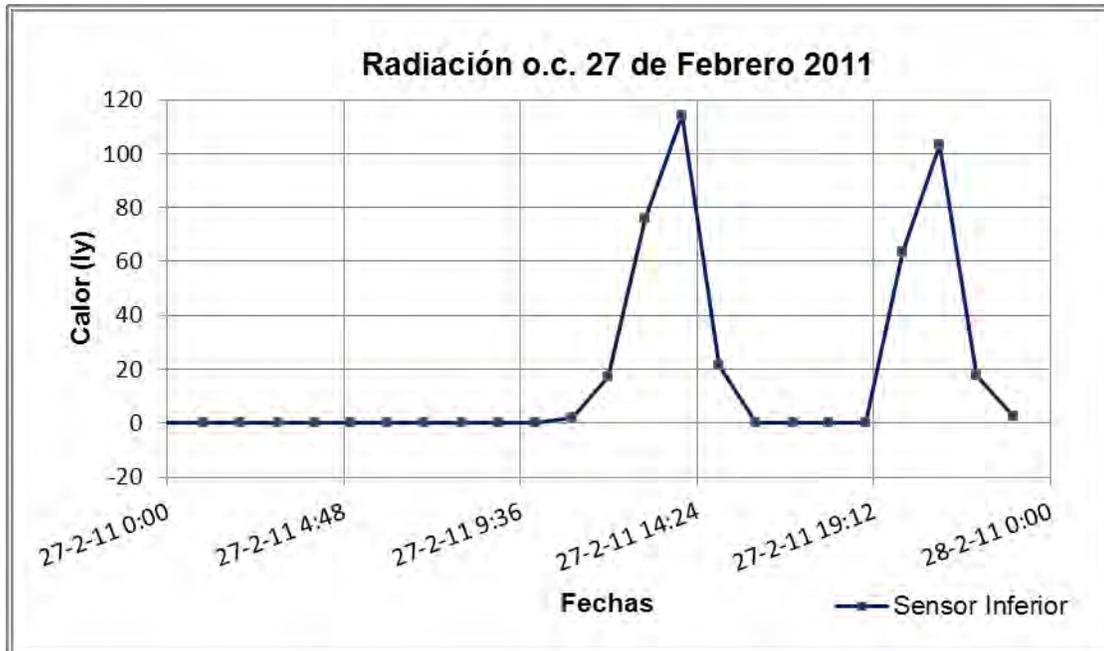
#### 4.6.2.2.5. Presión atmosférica

Los datos registrados en la estación meteorológica a la cota 2.860 m.s.n.m., registraron fluctuaciones entre 714 y 729 hPa, con un promedio durante la campaña de terreno de 724 hPa.

#### 4.6.2.2.6. Radiación onda corta, incidente y reflejada

Fallas en los sensores de radiación de la estación meteorológica automática del glaciar Universidad, impidieron medir directamente la radiación solar incidente, reflejada y el albedo de la superficie de nieve.

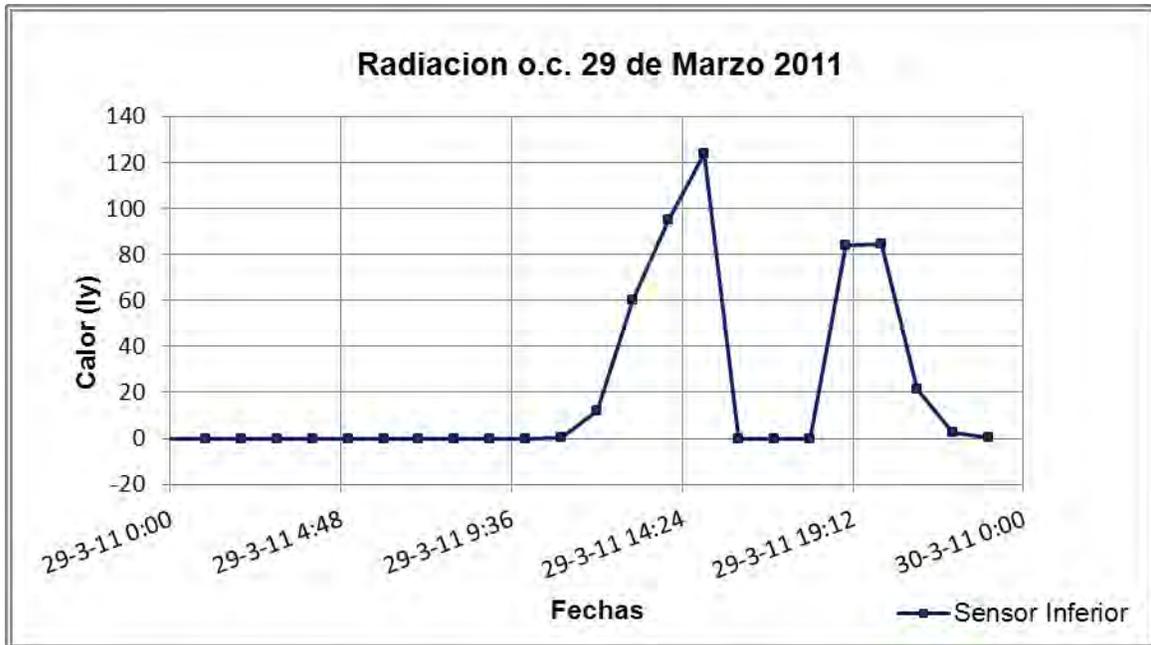
En las figuras 4.6.2.2.6-A a 4.6.2.2.6-D se muestran los datos de radiación solar onda corta registrados en fechas representativas, para periodos de 24 horas, de la estación meteorológica en el glaciar Universidad.



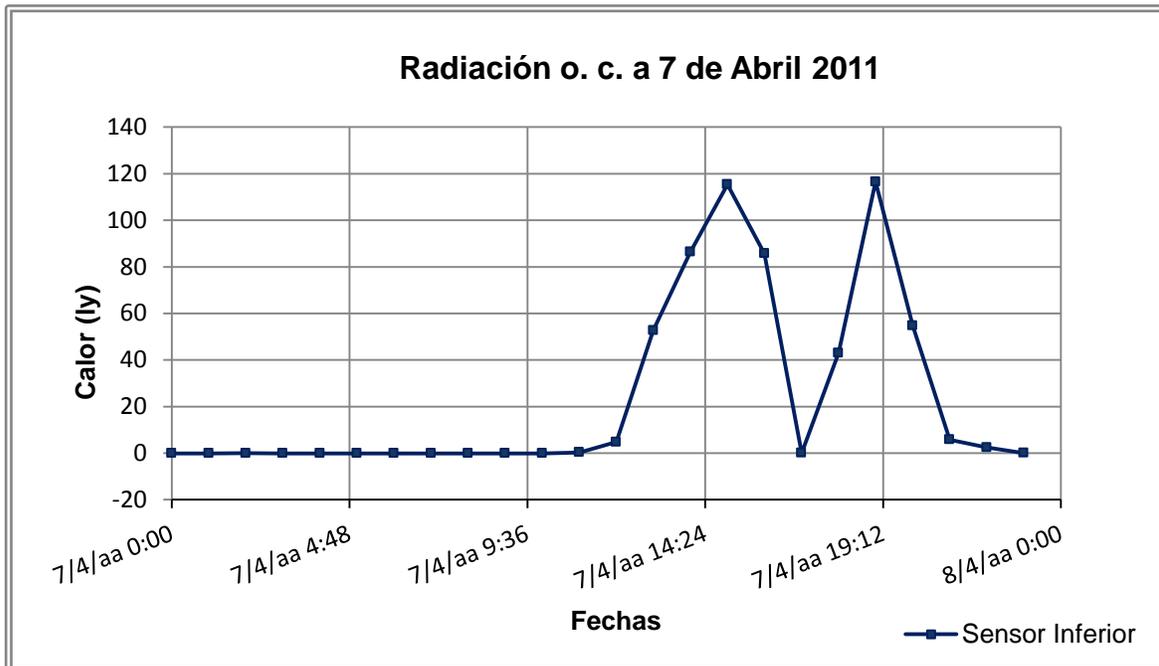
**Figura 4.6.2.2.6-A. Ejemplos de datos erróneos de radiación solar incidente, en fecha 27 de Febrero, en un periodo de 24 horas.**



**Figura 4.6.2.2.6-B. Ejemplos de datos erróneos de radiación solar incidente, en fecha 10 de Marzo, en un periodo de 24 horas.**



**Figura 4.6.2.2.6-C. Ejemplos de datos erróneos de radiación solar incidente, en fecha 29 de Marzo, en un periodo de 24 horas.**



**Figura 4.6.2.2.6-D. Ejemplos de datos erróneos de radiación solar incidente, en fecha 7 de Abril, en un periodo de 24 horas.**

En la tabla 4.6.2.2.6-A se muestra como ejemplo, el registro por hora de la radiación solar onda corta de la estación meteorológica ubicada en el glaciar Universidad. Se observan datos que no corresponden a parámetros representativos de radiación onda

corta. No registra datos en los horarios de entre las 14:00 y las 18:00 hrs. aproximadamente, para luego registrar en los horarios nocturnos.

**Tabla 4.6.2.2.6-A. Registro horario de radiación onda corta de la estación meteorológica en el glaciar Universidad.**

Fecha	Hora	Radiación Onda corta (W/m <sup>2</sup> )	
		Radiación Solar Incidente	Radiación Solar Reflejada
		SR_Stat10m	SSR_Stat10m
3/13/11	12:00:05 AM	-1,000	3,428
3/13/11	1:00:05 AM	-1,000	4,992
3/13/11	2:00:06 AM	-1,000	4,748
3/13/11	3:00:05 AM	-1,000	3,372
3/13/11	4:00:05 AM	-1,000	3,660
3/13/11	5:00:05 AM	-1,000	4,451
3/13/11	6:00:05 AM	-1,000	2,870
3/13/11	7:00:06 AM	-1,000	3,317
3/13/11	8:00:06 AM	-1,000	3,008
3/13/11	9:00:05 AM	-1,000	2,513
3/13/11	10:00:05 AM	-1,000	3,110
3/13/11	11:00:05 AM	13,415	18,997
3/13/11	12:00:05 PM	210,267	140,021
3/13/11	1:00:05 PM	833,179	514,071
3/13/11	2:00:06 PM	1227,562	769,032
3/13/11	3:00:05 PM	981,901	947,868
3/13/11	4:00:05 PM	0,000	1026,990
3/13/11	5:00:05 PM	0,000	1017,935
3/13/11	6:00:05 PM	0,000	927,716
3/13/11	7:00:06 PM	499,846	785,713
3/13/11	8:00:05 PM	1327,334	614,601
3/13/11	9:00:05 PM	854,444	404,867
3/13/11	10:00:05 PM	42,148	25,614
3/13/11	11:00:05 PM	8,781	9,009
3/14/11	12:00:05 AM	-1,000	1,773
3/14/11	1:00:05 AM	-1,000	2,056
3/14/11	2:00:06 AM	-1,000	1,577
3/14/11	3:00:05 AM	-1,000	1,085
3/14/11	4:00:05 AM	-1,000	1,413
3/14/11	5:00:05 AM	-0,999	2,255

Fecha	Hora	Radiación Onda corta (W/m <sup>2</sup> )	
		Radiación Solar Incidente	Radiación Solar Reflejada
		SR_Stat10m	SSR_Stat10m
3/14/11	6:00:06 AM	-1,000	1,366
3/14/11	7:00:06 AM	-0,712	0,952
3/14/11	8:00:05 AM	-0,492	0,646
3/14/11	9:00:05 AM	-0,984	-0,036
3/14/11	10:00:05 AM	-0,999	-0,121
3/14/11	11:00:05 AM	8,196	5,822
3/14/11	12:00:05 PM	87,233	38,187
<b>3/14/11</b>	<b>1:00:05 PM</b>	<b>99,853</b>	<b>58,241</b>
3/14/11	2:00:06 PM	169,807	100,720
3/14/11	3:00:05 PM	309,954	189,945
3/14/11	4:00:05 PM	261,341	156,962
3/14/11	5:00:05 PM	254,118	150,069
3/14/11	6:00:06 PM	306,226	189,239
3/14/11	7:00:05 PM	194,758	123,250
3/14/11	8:00:05 PM	161,252	111,520
3/14/11	9:00:05 PM	95,541	68,994
3/14/11	10:00:05 PM	72,411	50,091
3/14/11	11:00:05 PM	10,425	7,249
3/15/11	12:00:05 AM	-0,998	0,176
<b>3/15/11</b>	<b>1:00:05 AM</b>	<b>-1,000</b>	<b>1,369</b>
3/15/11	2:00:05 AM	-0,999	0,692
3/15/11	3:00:05 AM	-1,000	1,947
3/15/11	4:00:05 AM	-1,000	2,568
3/15/11	5:00:06 AM	-1,000	3,765
3/15/11	6:00:06 AM	-0,999	3,726
3/15/11	7:00:05 AM	-0,997	2,066
3/15/11	8:00:06 AM	-0,830	7,805
3/15/11	9:00:05 AM	-0,538	3,600
3/15/11	10:00:05 AM	-0,860	0,814
3/15/11	11:00:06 AM	3,149	5,046
3/15/11	12:00:05 PM	44,271	35,092
<b>3/15/11</b>	<b>1:00:05 PM</b>	<b>80,325</b>	<b>63,909</b>
3/15/11	2:00:05 PM	160,486	125,448
3/15/11	3:00:05 PM	208,720	165,893
3/15/11	4:00:05 PM	235,133	191,079

Fecha	Hora	Radiación Onda corta (W/m <sup>2</sup> )	
		Radiación Solar Incidente	Radiación Solar Reflejada
		SR_Stat10m	SSR_Stat10m
3/15/11	5:00:06 PM	219,572	181,995
3/15/11	6:00:05 PM	246,258	203,495
3/15/11	7:00:05 PM	195,638	163,410
3/15/11	8:00:05 PM	153,287	127,765
3/15/11	9:00:05 PM	91,893	79,019
3/15/11	10:00:05 PM	84,060	70,956
3/15/11	11:00:06 PM	13,237	13,087
03-04-2011	1:00:05 AM	-0,910	1,640
03-04-2011	2:00:05 AM	-0,992	-0,224
03-04-2011	3:00:05 AM	-0,936	0,545
03-04-2011	4:00:05 AM	-0,996	0,447
03-04-2011	5:00:06 AM	-0,986	0,144
03-04-2011	6:00:06 AM	-0,999	0,445
03-04-2011	7:00:05 AM	-1,000	1,357
03-04-2011	8:00:05 AM	-0,996	1,534
03-04-2011	9:00:05 AM	-1,000	0,744
03-04-2011	10:00:05 AM	-1,000	0,608
03-04-2011	11:00:05 AM	20,189	5,159
03-04-2011	12:00:05 PM	189,436	28,375
03-04-2011	1:00:05 PM	809,675	101,355
03-04-2011	2:00:05 PM	1220,576	145,880
03-04-2011	3:00:05 PM	493,637	183,663
03-04-2011	4:00:05 PM	0,000	211,888
03-04-2011	5:00:06 PM	0,000	234,294
03-04-2011	6:00:06 PM	0,000	231,387
03-04-2011	7:00:05 PM	1225,992	164,549
03-04-2011	8:00:05 PM	1017,542	136,803
03-04-2011	9:00:05 PM	772,324	109,239
03-04-2011	10:00:05 PM	187,281	25,781
03-04-2011	11:00:05 PM	40,862	4,895
03-05-2011	12:00:05 AM	0,866	-0,735
03-05-2011	1:00:05 AM	1,318	0,658
03-05-2011	2:00:05 AM	-0,972	-0,124
03-05-2011	3:00:05 AM	-0,993	0,104
03-05-2011	4:00:06 AM	-0,990	-0,228

Fecha	Hora	Radiación Onda corta (W/m <sup>2</sup> )	
		Radiación Solar Incidente	Radiación Solar Reflejada
		SR_Stat10m	SSR_Stat10m
03-05-2011	5:00:06 AM	-0,982	0,013
03-05-2011	6:00:05 AM	-0,982	0,537
03-05-2011	7:00:05 AM	-1,000	1,431
03-05-2011	8:00:05 AM	-0,999	1,610
03-05-2011	9:00:05 AM	-1,000	0,458
03-05-2011	10:00:05 AM	-1,000	0,195
03-05-2011	11:00:05 AM	20,251	4,322
03-05-2011	12:00:05 PM	168,726	24,606
03-05-2011	1:00:05 PM	746,303	91,961
03-05-2011	2:00:05 PM	1233,326	143,636
03-05-2011	3:00:05 PM	495,492	182,919
03-05-2011	4:00:06 PM	247,191	203,462
03-05-2011	5:00:05 PM	888,038	107,748
03-05-2011	6:00:05 PM	346,436	43,918
03-05-2011	7:00:05 PM	136,367	187,076
03-05-2011	8:00:05 PM	133,239	152,612
03-05-2011	9:00:05 PM	347,718	47,859
03-05-2011	10:00:05 PM	175,070	25,653
03-05-2011	11:00:05 PM	37,826	6,990
03-06-2011	12:00:05 AM	-0,969	1,727

En un esfuerzo por estimar la radiación de onda corta utilizando los datos de la estación meteorológica de San Andrés, se observó que, los datos de radiación solar de onda corta no representan parámetros congruentes, ya que en todo el periodo de estudio, no se reflejaron cambios de radiación solar incidente entre los tramos diurnos y nocturnos (ver archivo digital). Por ello, no fue posible realizar cálculos asociados a este parámetro.

En la tabla 4.6.2.2.6-B se muestra como ejemplo, datos de radiación onda corta registrados por hora en la estación San Andrés, se muestra un periodo de tres días.

**Tabla 4.6.2.2.6-B. Registro horario de radiación onda corta de la estación meteorológica en San Andrés.**

Fecha y Hora	Radiación Global corta (W/m <sup>2</sup> )
13-03-2011 0:00	53,76
13-03-2011 1:00	54,79
13-03-2011 2:00	49,32
13-03-2011 3:00	44,67
13-03-2011 4:00	44,17
13-03-2011 5:00	40,08
13-03-2011 6:00	38,13
13-03-2011 7:00	43,99
13-03-2011 8:00	41,11
13-03-2011 9:00	38,75
13-03-2011 10:00	32,78
13-03-2011 11:00	28,12
13-03-2011 12:00	23,00
13-03-2011 13:00	21,27
13-03-2011 14:00	19,18
13-03-2011 15:00	22,08
13-03-2011 16:00	18,72
13-03-2011 17:00	21,69
13-03-2011 18:00	28,02
13-03-2011 19:00	38,39
13-03-2011 20:00	51,00
13-03-2011 21:00	51,35
13-03-2011 22:00	45,87
13-03-2011 23:00	41,72
14-03-2011 0:00	42,41
14-03-2011 1:00	47,59
14-03-2011 2:00	51,67
14-03-2011 3:00	54,03
14-03-2011 4:00	60,82
14-03-2011 5:00	52,80
14-03-2011 6:00	60,27
14-03-2011 7:00	72,82
14-03-2011 8:00	76,44
14-03-2011 9:00	58,88
14-03-2011 10:00	55,18
14-03-2011 11:00	58,23
14-03-2011 12:00	54,82

<b>Fecha y Hora</b>	<b>Radiación Global corta (W/m<sup>2</sup>)</b>
14-03-2011 13:00	47,84
14-03-2011 14:00	52,12
14-03-2011 15:00	36,49
14-03-2011 16:00	52,50
14-03-2011 17:00	42,24
14-03-2011 18:00	47,99
14-03-2011 19:00	43,40
14-03-2011 20:00	46,80
14-03-2011 21:00	57,74
14-03-2011 22:00	47,74
14-03-2011 23:00	50,12
15-03-2011 0:00	53,40
15-03-2011 1:00	64,58
15-03-2011 2:00	86,85
15-03-2011 3:00	85,90
15-03-2011 4:00	88,28
15-03-2011 5:00	94,10
15-03-2011 6:00	81,29
15-03-2011 7:00	64,57
15-03-2011 8:00	61,93
15-03-2011 9:00	67,83
15-03-2011 10:00	70,60
15-03-2011 11:00	80,57
15-03-2011 12:00	95,98
15-03-2011 13:00	99,08
15-03-2011 14:00	89,41
15-03-2011 15:00	94,50
15-03-2011 16:00	77,02
15-03-2011 17:00	82,49
15-03-2011 18:00	64,93
15-03-2011 19:00	63,72
15-03-2011 20:00	59,61
15-03-2011 21:00	71,44
15-03-2011 22:00	82,59
15-03-2011 23:00	72,22

#### 4.6.2.2.7. Radiación onda larga, incidente y emitida

El sensor de radiación onda larga de la estación meteorológica automática, no contó con observaciones directas de la radiación neta en onda larga. Durante el 10 de Diciembre al 22 de Febrero no se registraron datos, y en los meses de Marzo y Abril, solo se cuenta con datos ocasionales, e inconsistentes.

Debido a lo anterior, no ha sido posible utilizar los datos de radiación onda larga.

En la tabla 4.6.2.2.7-A, como ejemplo se muestran los registros de radiación onda larga, de un lapso de tiempo de 3 días. Todos los datos de los registros del estudio se encuentran en formato digital.

**Tabla 4.6.2.2.7-A. Registro de radiación onda larga de la estación meteorológica en el glaciar Universidad.**

Fecha	Hora	Radiación Onda larga (W/m <sup>2</sup> )	
		Radiación Infrarrojo emitida	Radiación infrarrojo reflejada
		FR_Stat10m	SFR_Stat10m
03-01-2011	1:00:05 AM	0,000	359,749
03-01-2011	2:00:05 AM	361,150	360,462
03-01-2011	3:00:05 AM	0,000	361,118
03-01-2011	4:00:05 AM	0,000	359,454
03-01-2011	5:00:05 AM	0,000	359,302
03-01-2011	6:00:05 AM	0,000	357,369
03-01-2011	7:00:05 AM	0,000	355,484
03-01-2011	8:00:05 AM	0,000	354,630
03-01-2011	9:00:06 AM	0,000	352,536
03-01-2011	10:00:05 AM	0,000	353,592
03-01-2011	11:00:05 AM	0,000	355,203
03-01-2011	12:00:05 PM	0,000	356,273
03-01-2011	1:00:05 PM	0,000	363,844
03-01-2011	2:00:05 PM	0,000	373,294
03-01-2011	3:00:05 PM	0,000	384,411
03-01-2011	4:00:05 PM	0,000	389,157
03-01-2011	5:00:05 PM	0,000	389,324
03-01-2011	6:00:05 PM	0,000	391,861
03-01-2011	7:00:05 PM	0,000	393,717
03-01-2011	8:00:06 PM	0,000	394,108
03-01-2011	9:00:06 PM	0,000	388,930
03-01-2011	10:00:05 PM	0,000	377,143

Fecha	Hora	Radiación Onda larga (W/m <sup>2</sup> )	
		Radiación Infrarrojo emitida	Radiación infrarrojo reflejada
03-01-2011	11:00:06 PM	0,000	358,914
03-02-2011	12:00:05 AM	0,000	354,525
03-02-2011	1:00:05 AM	0,000	351,815
03-02-2011	2:00:05 AM	0,000	350,761
03-02-2011	3:00:05 AM	0,000	350,872
03-02-2011	4:00:05 AM	0,000	350,295
03-02-2011	5:00:05 AM	0,000	353,285
03-02-2011	6:00:05 AM	0,000	351,837
03-02-2011	7:00:05 AM	0,000	351,742
03-02-2011	8:00:06 AM	0,000	351,338
03-02-2011	9:00:05 AM	0,000	351,301
03-02-2011	10:00:05 AM	0,000	350,759
03-02-2011	11:00:05 AM	0,000	348,953
03-02-2011	12:00:05 PM	0,000	353,409
03-02-2011	1:00:05 PM	0,000	361,882
03-02-2011	2:00:05 PM	0,000	370,034
03-02-2011	3:00:05 PM	0,000	380,903
03-02-2011	4:00:05 PM	0,000	385,201
03-02-2011	5:00:06 PM	0,000	389,888
03-02-2011	6:00:05 PM	0,000	390,836
03-02-2011	7:00:06 PM	0,000	386,831
03-02-2011	8:00:06 PM	0,000	381,314
03-02-2011	9:00:05 PM	0,000	370,126
03-02-2011	10:00:06 PM	0,000	359,243
03-02-2011	11:00:05 PM	0,000	347,804
03-03-2011	12:00:05 AM	0,000	345,814
03-03-2011	1:00:05 AM	0,000	346,831
03-03-2011	2:00:05 AM	0,000	350,418
03-03-2011	3:00:05 AM	0,000	349,627
03-03-2011	4:00:05 AM	0,000	350,819
03-03-2011	5:00:05 AM	0,000	348,937
03-03-2011	6:00:06 AM	0,000	346,576
03-03-2011	7:00:06 AM	0,000	349,260
03-03-2011	8:00:05 AM	0,000	349,308
03-03-2011	9:00:06 AM	0,000	347,501
03-03-2011	10:00:05 AM	0,000	351,332

Fecha	Hora	Radiación Onda larga (W/m <sup>2</sup> )	
		Radiación Infrarrojo emitida	Radiación infrarrojo reflejada
03-03-2011	11:00:05 AM	0,000	356,395
03-03-2011	12:00:05 PM	0,000	357,496
03-03-2011	1:00:05 PM	0,000	360,785
03-03-2011	2:00:05 PM	0,000	369,189
03-03-2011	3:00:05 PM	0,000	375,378
03-03-2011	4:00:05 PM	0,000	379,791
03-03-2011	5:00:06 PM	0,000	385,772
03-03-2011	6:00:06 PM	0,000	387,450
03-03-2011	7:00:06 PM	0,000	388,420
03-03-2011	8:00:05 PM	0,000	387,790
03-03-2011	9:00:05 PM	0,000	383,461
03-03-2011	10:00:05 PM	0,000	367,836
03-03-2011	11:00:05 PM	0,000	354,394
03-04-2011	12:00:05 AM	0,000	352,250
03-04-2011	1:00:05 AM	0,000	351,909
03-04-2011	2:00:05 AM	59,232	358,702
03-04-2011	3:00:05 AM	58,874	354,834
03-04-2011	4:00:05 AM	0,000	355,909
03-04-2011	5:00:06 AM	0,000	357,361
03-04-2011	6:00:06 AM	0,000	358,832
03-04-2011	7:00:05 AM	0,000	362,344
03-04-2011	8:00:05 AM	0,000	362,782
03-04-2011	9:00:05 AM	0,000	355,476
03-04-2011	10:00:05 AM	0,000	352,635
03-04-2011	11:00:05 AM	0,000	352,132
03-04-2011	12:00:05 PM	0,000	352,938
03-04-2011	1:00:05 PM	0,000	360,422
03-04-2011	2:00:05 PM	0,000	369,902
03-04-2011	3:00:05 PM	0,000	372,287
03-04-2011	4:00:05 PM	0,000	375,743
03-04-2011	5:00:06 PM	0,000	382,115
03-04-2011	6:00:06 PM	0,000	386,386
03-04-2011	7:00:05 PM	313,876	382,023
03-04-2011	8:00:05 PM	246,533	373,111
03-04-2011	9:00:05 PM	305,412	368,951
03-04-2011	10:00:05 PM	238,955	363,485

Fecha	Hora	Radiación Onda larga (W/m <sup>2</sup> )	
		Radiación Infrarrojo emitida	Radiación infrarrojo reflejada
03-04-2011	11:00:05 PM	356,318	357,224
03-05-2011	12:00:05 AM	355,438	356,097
03-05-2011	1:00:05 AM	362,208	358,324
03-05-2011	2:00:05 AM	0,000	363,645
03-05-2011	3:00:05 AM	0,000	360,927
03-05-2011	4:00:06 AM	0,000	358,335
03-05-2011	5:00:06 AM	0,000	355,451
03-05-2011	6:00:05 AM	0,000	356,382
03-05-2011	7:00:05 AM	0,000	356,888
03-05-2011	8:00:05 AM	0,000	361,626
03-05-2011	9:00:05 AM	0,000	363,618
03-05-2011	10:00:05 AM	0,000	356,056
03-05-2011	11:00:05 AM	0,000	354,244
03-05-2011	12:00:05 PM	0,000	355,595
03-05-2011	1:00:05 PM	0,000	360,319
03-05-2011	2:00:05 PM	0,000	370,587
03-05-2011	3:00:05 PM	0,000	374,947
03-05-2011	4:00:06 PM	124,599	376,172
03-05-2011	5:00:05 PM	373,505	375,126
03-05-2011	6:00:05 PM	358,517	364,294
03-05-2011	7:00:05 PM	180,536	361,316
03-05-2011	8:00:05 PM	59,873	369,473
03-05-2011	9:00:05 PM	356,655	360,399
03-05-2011	10:00:05 PM	235,000	354,673
03-05-2011	11:00:05 PM	289,004	348,490
03-06-2011	12:00:05 AM	346,095	345,927

Los balances calóricos calculados para las superficies de glaciares en la cordillera del centro de Chile muestran, por un lado, la casi nula influencia de la temperatura del aire en la tasa de fusión (González, 2002) y por otro revelan la gran relevancia de la radiación en onda corta, tanto la incidente como el albedo. Por lo mismo, no existe una relación entre la temperatura del aire (que se pueda expresar en grado-día u otro parámetro) y la tasa de ablación.

En el caso antes mencionado de balance calórico durante 28 días de Febrero 2009, los

datos (publicados) son:

Fuentes de calor:

Balance de radiación en onda corta	+12.829 Ly
Balance de radiación en onda larga	-4.502 Ly
Balance de calor sensible	+24 Ly
Balance de calor latente	+ 93 Ly
Calor aportado por la precipitación	+8 Ly

Perdidas de calor:

Fusión de hielo y firn	7.683 Ly
Evaporación	770 Ly

La razón de lo anterior se debe, esencialmente, a que las habituales bajas temperaturas nocturnas introducen en el glaciar una onda de frío tal que el prácticamente equipara el aporte de energía por calor (temperatura) del aire diurno, el que se ocupa principalmente en disiparla. A diferencia de lo que ocurre en otras regiones como Patagonia y Alaska, donde la temperatura del aire sí importa en el balance calórico.

El balance de la radiación en onda corta sobre la superficie de un glaciar es  $G - R$ , donde  $G$  es la radiación en onda corta incidente y  $R$  es la radiación en onda corta reflejada por la superficie de nieve o hielo. También puede expresarse el balance de **radiación en onda corta con el albedo ( $\alpha$ ), en que:**

$$\alpha = R / G \quad \text{y}$$

$$G - R = G * (1 - \alpha)$$

$G$  y  $R$  en glaciares suelen medirse en una estación meteorológica instalada en el glaciar.

El albedo no tiene relación alguna con la temperatura atmosférica, sino principalmente con las condiciones de la superficie del glaciar, y secundariamente con la radiación incidente (puesto que es una proporción de ella). El albedo varía fuertemente en glaciares de superficies muy irregulares, como son los penitentes o en glaciares con variadas

proporciones de impurezas. Esto incluso cuando las condiciones de temperatura sean iguales o similares.

Ejemplo de valores de albedo son:

- En el glaciar Juncal Norte, a la cota de 3.550 m.s.n.m., aspecto NW y penitentes mediana altura, desde el 30 Noviembre al 6 Diciembre 2000, el albedo promedio diario es de 0,52 (Gonzalez, 2002).
- En el glaciar Loma Larga, a la cota de 4.667 m.s.n.m., aspecto S y con penitentes de mediana altura, se ha registrado un albedo promedio diario de 0,44 para el período comprendido entre el 22 y 28 Enero 2000 (Gonzalez, 2002).
- En el proyecto minero Pascua-Lama, a la cota aproximada de 5.200 a 5.300 m.s.n.m., se tiene un albedo promedio diario que varía de 0,50 a 0,65 entre las 08:00 y 18:00 hrs, para fines de Enero y Marzo, en los glaciares Guanaco y Ortiga 1 que presentan penitentes relativamente bajos (0,2 a 0,5 m), y una pendiente de 10° orientada al S y SW (CEAZA, 2008).
- En Pascua-Lama, a la cota aproximada entre los 5.200 y 5.300 m.s.n.m., el albedo observado es de 0,75 a 0,85 como promedio diario entre las 08:00 y 18:00 hrs., en días con nieve fresca, para fines de Enero y Marzo, en la superficie de los glaciares Guanaco y Ortiga 1 (CEAZA, 2008).

#### **4.6.3. Resultados del balance calórico**

La estación meteorológica se instaló como indica en el capítulo 2.4.1.3, a la cota de 2.860 m.s.n.m. Comenzó con registros meteorológicos en terreno el 10 de Diciembre de 2010, hasta la fecha de su desmontaje el 15 de Abril 2011.

Como se explica en el capítulo 2.4.2, detectaron fallas en la configuración y algunos sensores de la estación, lo que resultó en una base de datos con información insuficiente e inconsistente como para permitir efectuar un balance calórico.

Insuficiente, debido a que no se registraron datos en forma regular en el sensor de radiación solar durante el mayor período de registros, entre el 22 de Febrero de 2011 y 16 de Abril de 2011.

Inconsistente, ya que los datos obtenidos por el sensor de radiación no corresponden a lo que se debe esperar en términos de periodos y valores de radiación para el entorno característico de un glaciar.

La información de los parámetros de radiación se considera fundamental para el cálculo de balance calórico, y en el caso del cálculo para el glaciar Universidad, esto nos imposibilitó de realizar cualquier tipo de estimación.

## 5. PROPUESTA DE RED GLACIOLÓGICA

### 5.1. ASPECTOS GENERALES

Como parte del compromiso adquirido a través del acuerdo para llevar a cabo el "Catastro, exploración y estudio de glaciares en Chile central" se trabajó en estudios y monitoreo del glaciar Universidad, y la de identificación de glaciares que reúnan las características necesarias para calificar como representativos de su cuenca. Esto se refiere a dimensiones y características de superficie, adecuada para permitir desarrollar trabajos de monitoreo durante la temporada de verano, facilidades de acceso y factibilidad de instalar una estación de aforo para controlar de la mejor manera posible el caudal que escurre desde los glaciares.

En base a esto se hace una propuesta de glaciares para monitoreo, por cuenca. Dos de los cuatro glaciares propuestos, el de la cuenca del Maule y el de la cuenca del Maipo, cumplen con las características deseadas. En el caso de los glaciares propuestos para la cuenca del Aconcagua y la cuenca del Rapel, no cuentan con acceso expedito, sin embargo, aun así se considera como la mejor alternativa en sus correspondientes cuencas.

Respecto al acceso a estos cuatro glaciares propuestos, la situación es como sigue:

- El glaciar ubicado al oeste del glaciar Monos de Agua, en la cuenca del Río Aconcagua, se encuentra en terreno privado, propiedad de la familia Kenrick, siendo este parte del Parque Andino Juncal, para su ingreso se debe obtener el correspondiente permiso de acceso al área.
- El glaciar Olivares Alfa, en la cuenca del Río Maipo, se encuentra en terrenos de Bienes Nacionales y solo se debe informar del ingreso al área.
- El glaciar del sector Cipreses, en la cuenca del Río Rapel, se encuentra en una Reserva Nacional Río Cipreses, administrada por CONAF, institución a la cual se debe solicitar el permiso de ingreso.

- El glaciar del cerro Pellado se ubica en terrenos particulares. El camino de acceso al glaciar por el valle La Plata está controlado por la empresa Magma, que realiza estudios para el desarrollo de energía geotérmica en el área, y a ellos se debe solicitar la autorización para el ingreso.

## **5.2. PROPOSICIÓN DE NUEVO PUNTO PARA ESTACIÓN DE AFORO DEL GLACIAR UNIVERSIDAD**

Anteriormente se ha señalado lo inadecuado del terreno donde se emplaza la actual estación fluviométrica en el río que descarga de la laguna pro glacial ubicada en el frente del glaciar Universidad. Considerando esto y que la actual estación debe ser de todas maneras reparada, se propone un nuevo emplazamiento para la estación.

La ubicación propuesta para la nueva estación de aforo cercana al glaciar Universidad, se encuentra a unos 900 metros aguas abajo de la estación actual (Figura 5.2-A y 5.2-B). A diferencia del sitio en que se encuentra actualmente la estación, en el que los materiales del suelo en la margen del río son esencialmente gravas y arenas muy permeables, en el nuevo sitio propuesto el material en las márgenes del río es de tipo morrena glacial, compuesto de bloques angulosos, gravas angulosas o de escaso redondeamiento, y relativamente abundantes finos (estimados visualmente como del orden de 12 a 15% del volumen de suelo), vale decir un sector donde las márgenes y lecho del río se encuentra en materiales poco permeables. El estero está bien encauzado y las coordenadas del punto de la estación propuesta son 375.518,25 E y 6.157.060,11 S. La cota del punto, medida con GPS es del orden de 2.430 m.s.n.m.

Aguas arriba del nuevo emplazamiento propuesto entran otros cauces además de la descarga de las aguas que emergen del glaciar Universidad, uno que descarga en el frente del glaciar Universidad desde el Sur y dos más pequeños que descargan desde el Norte; esto obliga aforar también estos esteros si se desea evaluar la descarga de solo la cuenca del glaciar. En todo caso, esto ocurre también con la posición actual de la estación, que recibe la descarga no solo del glaciar Universidad, sino también de otras quebradas laterales.



**Figura 5.2-A. Ubicación propuesta para el nuevo emplazamiento de la estación de aforo cercana al glaciar Universidad; en imagen satelital Google Earth. Centro arriba, el frente del glaciar. Centro abajo, el nuevo emplazamiento propuesto.**



**Figura 5.2-B. Detalle de la ubicación propuesta para el nuevo emplazamiento de la estación de aforo cercana al glaciar Universidad. Vista desde aguas arriba del punto.**

En el sitio propuesto, en el momento de la visita a terreno de los días 16 y 17 de Noviembre de 2010 el cauce del río, si bien irregular, era de 10 a 12 m de ancho, la profundidad media era del orden de 0,4 m, y la máxima profundidad era del orden de 0,9 m. En el lecho (cruzado a pie y con cuerdas de seguridad) se encuentran gravas gruesas, de manera que el flujo es turbulento.

Peligros naturales que podrían afectar el nuevo punto de aforo propuesto son:

- Las crecidas asociadas a altas tasas de fusión del manto de nieve y del glaciar, en las épocas de primavera y verano, probablemente con arrastre de material detrítico.
- El peligro de eventos sísmicos.
- Vientos fuertes y rayos en tormentas de invierno y verano.
- La cubierta y carga del manto de nieve invernal. La ocurrencia de avalanchas de nieve en la zona y posiblemente en el sector.
- Eventuales inestabilidades en las laderas montañosas de fuerte pendiente del entorno, con ocasionales caídas de rocas (en particular durante eventos sísmicos).

### **5.3. LOS GLACIARES PROPUESTOS POR CUENCA**

Los glaciares propuestos para monitoreo en las cuatro cuencas hidrográficas, son los siguientes:

- El glaciar al Oeste del glaciar Monos de Agua en la cuenca del Río Aconcagua.
- El glaciar Olivares Alfa en la cuenca del Río Maipo.
- Un glaciar sin nombre en la cuenca del Río Rapel.
- El glaciar de la falda Sur-sureste del cerro Pellado (y que en adelante denominamos como glaciar Pellado).

Como se señaló anteriormente, la selección de estos glaciares se ha realizado de manera que cumplieran con la mejor combinación de atributos tales como representatividad de la cuenca, cercanía a un camino de acceso, facilidad de acceso, dimensiones adecuadas para un estudio que no exigiera una mayor y complicada operación logística, y factibilidad para aforar en puntos que representaran de la mejor manera la escorrentía proveniente desde el glaciar, entre otras.

En la tabla 5.3-A se encuentran las coordenadas de los glaciares propuestos.

**Tabla 5.3-A. Ubicación geográfica de un punto central de los glaciares propuestos, en coordenadas UTM.**

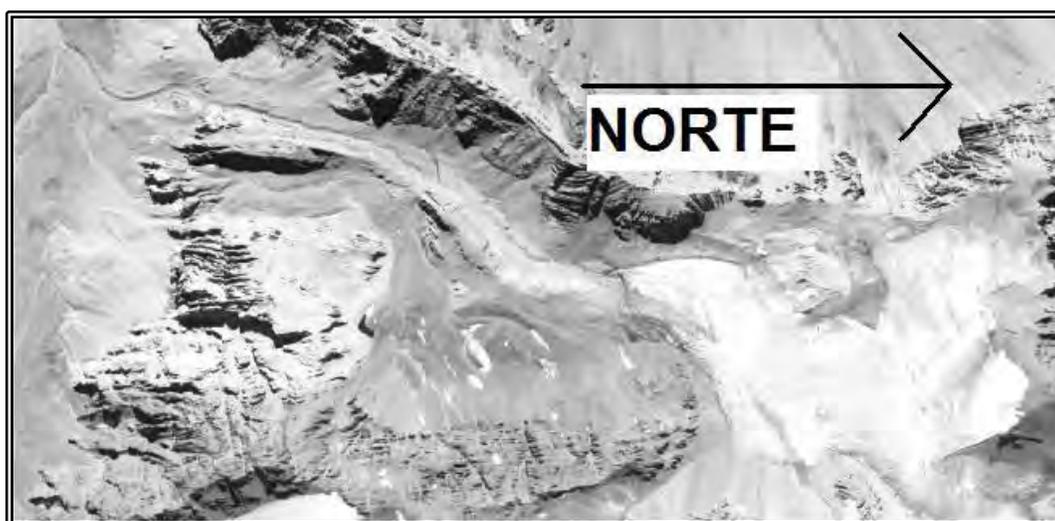
Cuenca	Glaciar	Coordenadas UTM	
		Este	Sur
Aconcagua	Sin nombre	402469	6351220
Maipo	Olivares Alfa	385509	6326315
Rapel	Sin nombre	373191	6170234
Maule	Pellado	338979	6016936

#### **5.4. EL GLACIAR EN LA CUENCA DEL RÍO ACONCAGUA**

##### **5.4.1. El glaciar ubicado al oeste del glaciar Monos de Agua**

El glaciar propuesto para monitoreo en la cuenca del Río Aconcagua se encuentra al Oeste del glaciar Monos de Agua. Se ubica en la comuna de Los Andes, V Región. La superficie es de 0,56 km<sup>2</sup>, su pendiente media es de 12,2°, la cota máxima es de 4.700 m.s.n.m., y su cota mínima es de 4.350 m.s.n.m. El aspecto del glaciar es hacia el Sur.

En la figura 5.4.1-A, se muestra el glaciar propuesto, ubicado en el margen inferior derecho. La imagen corresponde a parte de una fotografía aérea SAF 96, N° 2592.



**Figura 5.4.1-A. Detalle glaciar al Oeste del glaciar Monos de Agua. Fotografía SAF escala 1:50.000**

#### **5.4.2. La estación de aforo**

Las coordenadas del punto de aforo, obtenidas con GPS, son:

32°59'46,8" S

70° 03'20,2" O

En coordenadas UTM: 6459127N; 405542E

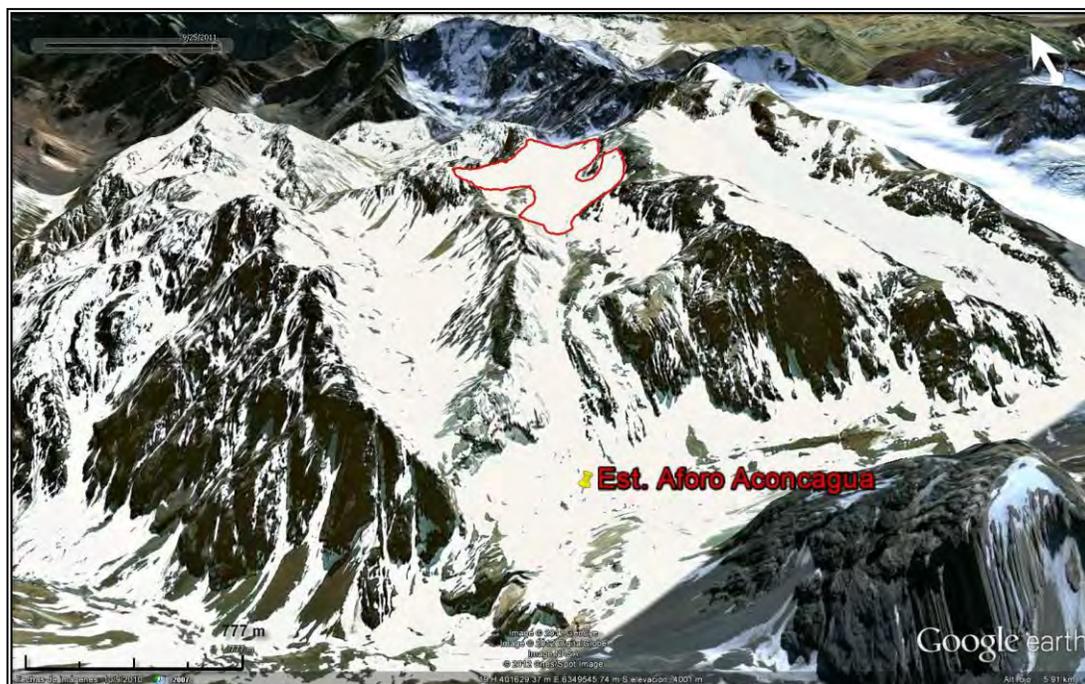
La cota del punto es de 3.548 m.s.n.m.

El viaje exploratorio al glaciar y al eventual punto de ubicación de estación de aforo, se realizó entre el 24 y el 27 de Mayo de 2011.

El acceso se realizó a caballo desde la entrada al parque Juncal Andino. Después de 5 horas de cabalgata (Figura 5.4.2-A y 5.4.2-B) se deben dejar los caballos para seguir a pie. En este punto se encuentra un importante desnivel que debe ser sobrepasado antes de enfrentar el acceso al valle por donde fluyen las aguas que provienen del glaciar, y desde donde se logra apreciar el valle donde se ubica el glaciar propuesto (Figura 5.4.2-C).



**Figura 5.4.2-A. Trayecto hacia el glaciar desde el sector de Hornitos. En línea roja el acceso en caballos. En azul el trayecto a pie.**



**Figura 5.4.2-B. Ubicación del glaciar propuesto y del punto de aforo propuesto en la quebrada de Monos de Agua.**

En la imagen de las figuras. 5.4.2-C y 5.4.2-D se aprecia la ladera que se debe superar para acceder al glaciar, además de la ubicación propuesta de la estación de aforo. Se muestra, también, el cauce del estero que baja desde el glaciar, bien definido, sin influencia de otra cuenca y con una pendiente moderada.



**Figura 5.4.2-C. Ubicación del punto de aforo propuesto en la quebrada Monos de agua. El glaciar se ubica por sobre la quebrada y garganta rocosa, en el sitio aproximado marcado con letra I.**

En el punto de aforo propuesto (Figuras 5.4.2-D, 5.4.2-E y 5.4.2-F), el estero baja desde el glaciar por un estrecho cañadón de una decena de metros de profundidad, labrado en material morrénico de permeabilidad estimada como baja debido al contenido de finos. El cañadón posee unos 8 a 10 m de ancho en su base y su piso está cubierto por gravas angulosas y redondeadas, permeables. El espesor del relleno de gravas es probablemente de 2 a 4 m. Los taludes del cañadón están compuestos por el material morrénico, de buena cohesión y bastante abruptos (con inclinaciones del orden de 60° a 70°).

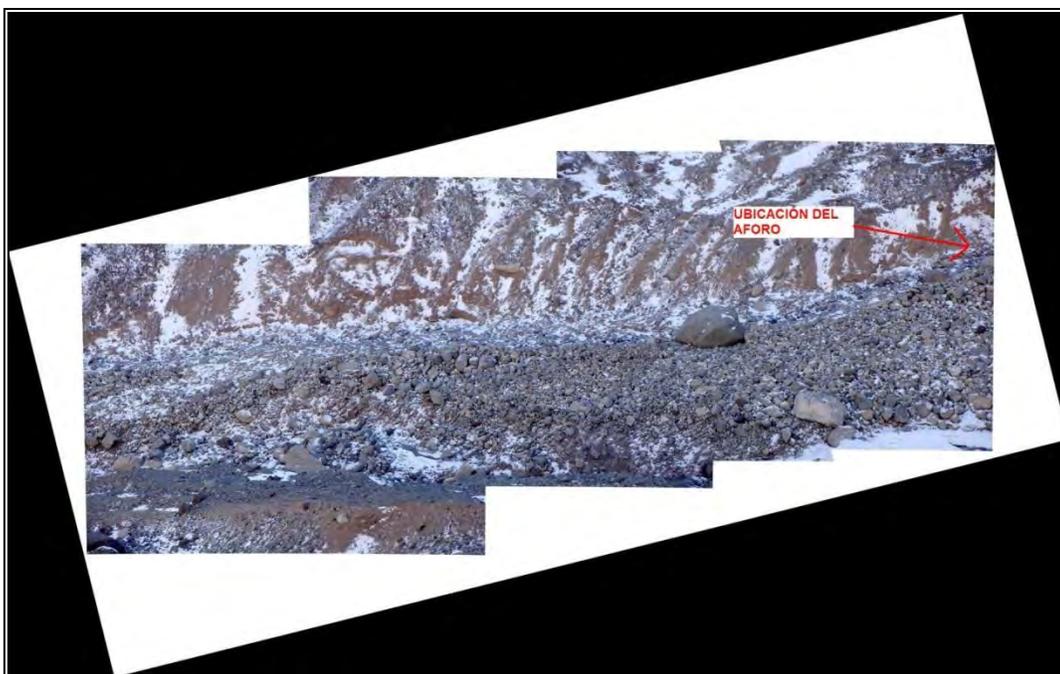
Durante la visita a terreno realizada hacia fines de Mayo, el caudal del estero era bajo, estimado en aproximadamente 50 a 60 l/s. El curso de agua, de 2 a 3 m de ancho, escurría entre los bolones y bloques del fondo de la quebrada, de manera muy turbulenta, y con profundidades máximas del orden de 0,2 a 0,3 m.



**Figura 5.4.2-D. Ubicación de la estación de aforo propuesta, en desembocadura de la quebrada que desagua el glaciar al Oeste del glaciar Monos de Agua.**



**Figura 5.4.2-E. Ubicación de la estación de aforo, en la descarga del cañadón que baja desde el glaciar Monos de Agua.**



**Figura 5.4.2-F. Ubicación de la estación de aforo, en la descarga del cañadón que baja desde el glaciar al Oeste del glaciar Monos de Agua.**

Los peligros naturales que podrían afectar el punto de aforo son:

- Las crecidas asociadas a altas tasas de fusión del manto de nieve y del glaciar, en las épocas de primavera y verano, probablemente con arrastre de material detrítico.
- El peligro de eventos sísmicos.
- Vientos fuertes y rayos en tormentas de invierno y verano.
- La cubierta y carga del manto de nieve invernal.
- la ocurrencia de avalanchas de nieve en el sector.
- Eventuales inestabilidades en las laderas montañosas de fuerte pendiente del entorno, con ocasionales caídas de rocas (en particular durante eventos sísmicos).
- Inestabilidad, muy local, del talud en material morrénico erosionado por el cauce de agua que baja por la quebrada en que se ubica el propuesto punto de aforo.

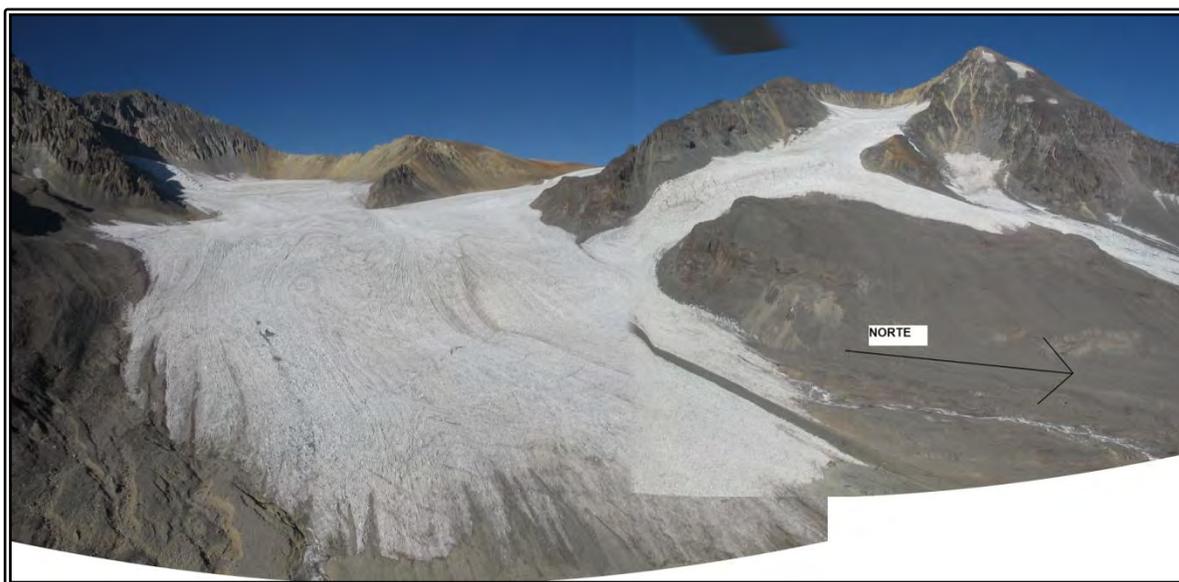
## **5.5. EL GLACIAR EN LA CUENCA DEL RÍO MAIPO**

### **5.5.1. El glaciar Olivares Alfa**

El glaciar que se propone monitorear en la cuenca del Río Maipo es el Olivares Alfa Sur (el adjetivo Sur se emplea para diferenciarlos de otros remanentes del glaciar Olivares Alfa).

Este glaciar se encuentra en la cabecera de la cuenca Olivares, al Norte del cerro Littoria y al Sur-este del cerro Altar, en la comuna de San José de Maipo de la Región Metropolitana. La superficie es de 5,14 km<sup>2</sup>. La pendiente media es de 15,7°, la cota máxima se encuentra a los 4.700 m.s.n.m. y la mínima a los 4.200 m.s.n.m. El aspecto del glaciar es hacia el Nor-noreste.

En la figura 5.5.1-A, se muestra el glaciar propuesto, fotografiado desde helicóptero el día 28 de Marzo de 2011.



**Figura 5.5.1-A. Glaciar Olivares Alfa Sur, fotografiado desde el Norte en un vuelo en el sector.**

### **5.5.2. Estación de aforo**

La estación de aforo propuesta se ubica aproximadamente 500 m aguas abajo del frente actual del glaciar Olivares Alfa, en las siguientes coordenadas geográficas y UTM respectivamente:

33°09'55,0" S, 70°12'26,3 W y,  
6348269N, 406582E.

La cota del punto de aforo es de 4.013 m.s.n.m. (Figura 5.5.2-A). Este punto fue visitado entre los días 3 y 8 de Mayo de 2011.

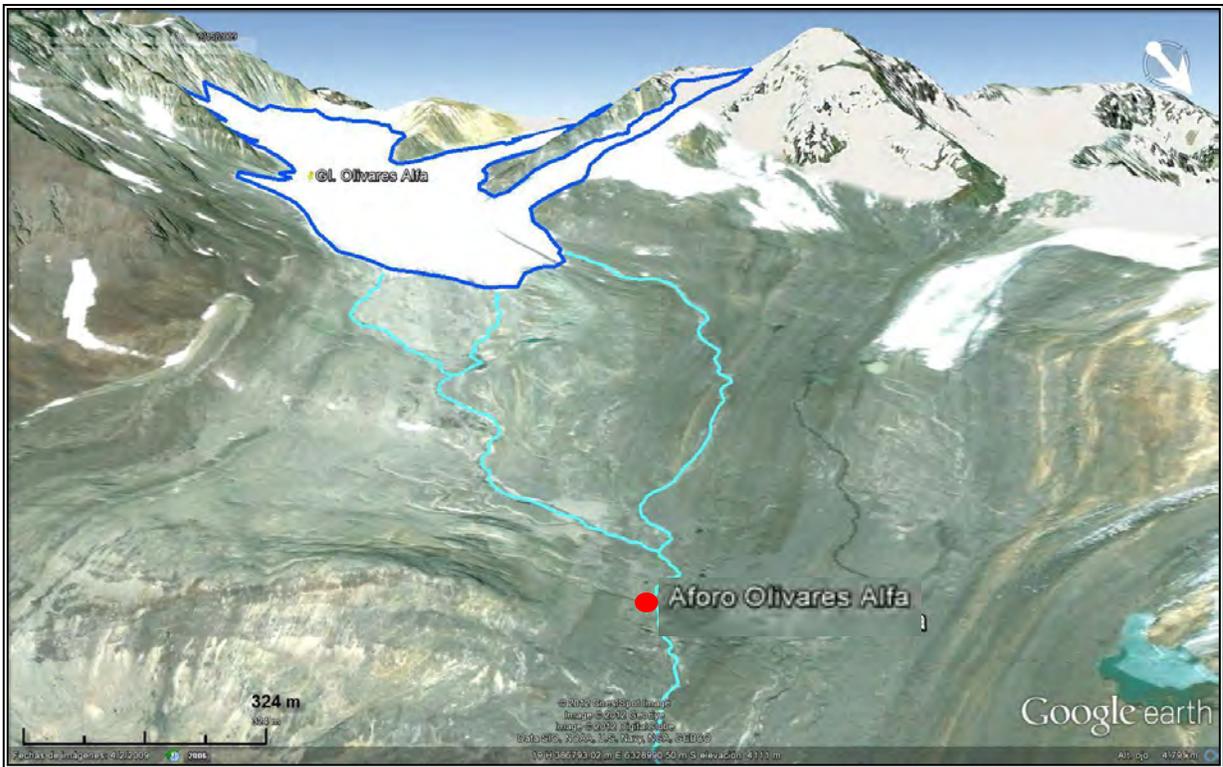
El cauce del estero que desciende desde el glaciar Olivares Alfa está dividido en dos brazos poco más arriba del punto propuesto para la estación de aforo, de manera que debe cuidarse de proyectar la ubicación inmediatamente aguas abajo de donde ambos brazos se unen. En el sitio existen gravas fluviales permeables, por sobre un material morrénico de baja permeabilidad en ambos taludes laterales. La estructura debe anclarse en este material morrénico para reducir filtraciones.

En el punto de aforo propuesto (Figuras 5.5.2-B y 5.5.2-C), el ancho del cauce mojado es de aprox. 2,5 m, con profundidad no mayor que 0,5 m. El ancho total del cauce es del orden de 10 m. Se estimó el caudal escurriente en alrededor de 200 a 300 l/s.

Para este estudio, se accedió al punto de aforo propuesto mediante el uso de helicóptero. También es posible acceder al punto de aforo por el Valle del Río Olivares, un trayecto que toma 1,5 a 2 días en mula o a pié. Una tercera alternativa de acceso es por el valle de Yerba Loca, desviándose desde el sector de Piedra Carvajal hacia el este, por el Cajón de Sulfatos y ascendiendo hasta el portezuelo en la cabecera del glaciar Olivares Alfa; hasta este punto el recorrido es de 1,5 a dos días en mula o a pié. Desde el portezuelo al punto de aforo se debe bajar a pié por el glaciar Olivares Alfa hasta su frente (un recorrido por una superficie de hielo de pendiente suave y poco agrietada, pero con penitentes) y luego continuar hasta el punto de aforo por un terreno natural sin huellas, rocoso, y de suave pendiente, un recorrido que toma aproximadamente 3 horas en total.

Peligros naturales que podrían afectar el punto de aforo son:

- Las crecidas asociadas a altas tasas de fusión del manto de nieve y del glaciar, en las épocas de primavera y verano.
- El peligro de eventos sísmicos.
- Vientos fuertes y rayos en tormentas de invierno y verano.
- La cubierta y carga del manto de nieve invernal.



**Figura 5.5.2-A. Vista del glaciar, y el lugar propuesto para construir la estación de aforo en el cauce que reúne las aguas que emergen del glaciar Olivares Alfa.**



**Figura 5.5.2-B. Vista del punto de aforo en el estero del Olivares, desde unos 70 m aguas arriba del punto.**



**Figura 5.5.2-C. Vista hacia el frente del glaciar Olivares Alfa, desde el punto de aforo propuesto.**

## **5.6. EL GLACIAR EN LA CUENCA DEL RÍO RAPEL**

### **5.6.1. Glaciar al oeste del glaciar Cipreses**

El glaciar propuesto para monitoreo en la cuenca el Río Rapel se encuentra al interior de la Quebrada Los Arrieros, afluente desde el Sur del Río Cipreses, en la comuna de San Fernando, VI Región. El glaciar posee una superficie de 1,72 km<sup>2</sup>, la pendiente media es de 18,9°, su cota máxima es de 4.170 m.s.n.m. y la mínima es de 3.330 m.s.n.m. El aspecto del glaciar es hacia el Nor-noroeste.

En la figura 5.6.1-A, se observa el glaciar propuesto delineado en rojo. La imagen es una satelital de público acceso, de los programas Google Earth. La fecha de la imagen es del 31 de Marzo de 2009.



**Figura 5.6.1-A Glaciar propuesto para monitoreo, ubicado al interior de la quebrada Los Arrieros, en la cuenca de alta montaña del río Rapel. Imagen satelital extraída de los archivos públicos de Google Earth.**

### **5.6.2. Estación de Aforo**

En los días 17 y el 20 Mayo se visitó el punto del aforo ubicado en la quebrada los Arrieros, al interior de la reserva Río Cipreses.

Se accede en vehículo por Reserva Nacional Río Cipreses hasta final del camino vehicular que entra en dirección Los Maitenes. Este lugar es el punto de encuentro con los arrieros que apoyan el acceso a los valles interiores. El lugar propuesto para la estación de aforo queda al fondo de la Quebrada de Los Arrieros, distante 2 jornadas a caballo desde Maitenes, el punto de ingreso a la reserva nacional. El punto de aforo propuesto se ubica en las coordenadas obtenidas con GPS, en coordenadas geográficas y UTM respectivamente:

**34°34'27,4" S, 70°24'43,8" y**

6237393 N, 407650 E

La cota aproximada de 2.369 m.s.n.m. (Figuras 5.6.2-A, 5.6.2-B y 5.6.2-C).

Se ha preferido esta ubicación para la estación de aforo, por sobre otra posible ubicación distante de la propuesta aproximadamente 1.300 m aguas arriba por el valle, debido a las apreciables dificultades de acceso con caballos o mulas a este segundo punto a mayor cota.

En el punto de aforo propuesto existe un cauce de aproximadamente 4 a 5 m de ancho, relleno con gravas fluviales redondeadas y algo angulosas, dentro de un pequeño y estrecho cañadón, del orden de 12 a 15 m de ancho y 4 a 5 m de alto en las riberas, erosionado en suelos morrénicos con algo de finos, de probablemente baja permeabilidad. Los materiales morrénicos cubren un terreno de base rocosa, con un espesor que parece no exceder de aproximadamente 10 m, a juzgar por la disposición de los afloramientos de roca cercanos en el fondo de la quebrada (Figura 5.6.2-B). El relleno de gravas fluviales en el cauce es, probablemente, del orden de 4 m de espesor.

Durante la visita al terreno, los días 17 al 20 de Mayo de 2011, el caudal del río era extremadamente bajo, de 60 a 70 litros/segundo, regulado por las condiciones frías de inicio de la temporada invernal. En estas condiciones, la profundidad máxima del curso de agua era no mayor que 0,2 a 0,3 m, y el flujo es turbulento entre las gravas del cauce.



**Figura 5.6.2-A. Glaciar propuesto para la cuenca del Río Rapel, y ubicación del punto propuesto para instalar la estación de aforo, en imagen Google Earth.**



**Figura 5.6.2-B. Ubicación muro estación de aforo.**



**Figura 5.6.2-C. Paso estrecho en el acceso al sector alto de la quebrada Los Arrieros.**

Peligros naturales que podrían afectar el punto de aforo son:

- Las crecidas asociadas a altas tasas de fusión del manto de nieve y del glaciar, en las épocas de primavera y verano, probablemente con arrastre de material detrítico.
- El peligro de eventos sísmicos.
- Vientos fuertes y rayos en tormentas de invierno y verano.
- La cubierta y carga del manto de nieve invernal.
- La ocurrencia de avalanchas de nieve en la zona y posiblemente en el sector.
- Eventuales inestabilidades en las laderas montañosas de fuerte pendiente del entorno, con ocasionales caídas de rocas (en particular durante eventos sísmicos).

## **5.7. EL GLACIAR EN LA CUENCA DEL RÍO MAULE**

### **5.7.1. El glaciar Pellado**

El glaciar cuyo monitoreo se propone en la cuenca del Río Maule, se encuentra al interior de la comuna de Colbún en la VII Región. El glaciar posee una superficie de 0,88 km<sup>2</sup>, una pendiente media de 15,7°. Su cota máxima es de 3.200 m.s.n.m. y su cota mínima es de 2.600 m.s.n.m. El glaciar posee aspecto al Sur-sureste.

En la figura 5.7.1-A, se muestra el glaciar propuesto para la cuenca del Maule, fotografiado por el Sr. Fernando Escobar, durante un vuelo en helicóptero efectuado el día 23 de Marzo del 2011.



**Figura 5.7.1-A. El glaciar propuesto para monitoreo en la cuenca del Río Maule, ubicado en la falda Sur-sur este del Volcán Pellado. Fotografía del Sr. Fernando Escobar (DGA), obtenida el día 23 de Marzo de 2011.**

### **5.7.2. Estación de aforo**

El glaciar seleccionado se ubica en la cuenca del Río Maule, por cuyo valle se accede, hasta encontrar el valle La Plata que desemboca en el del Maule por el Sur.

El día 23 de Marzo de 2011 se visitó el punto de aforo. En la ocasión se utilizó un helicóptero, con en el que realizamos el acercamiento al punto de aforo propuesto. En esta visita a terreno participó el Sr. Fernando Escobar de la Dirección General de Aguas.

El acceso vehicular al glaciar y punto de aforo es expedito a través del valle La Plata; en ese lugar se encuentra una empresa realizando prospecciones geotérmicas, por lo que han habilitado un camino que permite acceder en vehículo hasta las cercanías del glaciar. El trayecto a pie desde el final del camino al punto de aforo demora del orden de 2 horas.

Las coordenadas del punto propuesto para la instalación de la estación de aforo (Figuras 5.7.2-A a 5.7.2-C), obtenidas con GPS en coordenadas geográficas y coordenadas UTM respectivamente:

35°59'47,9" S ,70°46'42,9" y,  
6126500.1 N, 408746.7 E

El ancho del cauce en el punto propuesto para la estación de aforos era de aproximadamente 2,5 a 3,0 m en ocasión de la visita al terreno. Su profundidad máxima la estimamos del orden de 0,7 m y la media del orden de 0,3 a 0,4 m. En el cauce, y en sus márgenes, se observan ocasionales grandes bolones, y son comunes los bloques de 0,5 a 1 m de diámetro. Esto hace al flujo uno de tipo muy turbulento.

En la ribera Oeste del cauce afloran rocas volcánicas de baja permeabilidad. En la ribera oriental se observan suelos de materiales morrénicos, con algo de finos, probablemente de baja permeabilidad.

Peligros naturales que podrían afectar el punto de aforo son:

- Las crecidas asociadas a altas tasas de fusión del manto de nieve y del glaciar, en las épocas de primavera y verano, probablemente con significativo arrastre de material detrítico.
- El peligro de eventos sísmicos.
- Vientos fuertes y rayos en tormentas de invierno y verano.
- La cubierta y carga del manto de nieve invernal.
- Una eventual reactivación del volcán Pellado. Según el Global Volcanism Program del Smithsonian National Museum of Natural History, no existen antecedentes históricos de erupciones, pero se observan fumarolas en el flanco Sudeste del volcán (Ver también referencia de Costa y Singer, 2002).



**Figura 5.7.2-A. Vista aérea del glaciar en el Volcán Pellado y de la ubicación del punto de aforo aguas abajo del glaciar. Calzar punto de aforo con el cause.**



**Figura 5.7.2-B. Ubicación del lugar propuesto para la construcción del aforo, aguas abajo del lugar donde confluyen los cauces provenientes del glaciar.**



**Figura 5.7.2-C. La estación de aforos se ubicaría en el frente de un remanso en el cauce, al centro-derecha de la foto.**

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De acuerdo a los resultados generales de este inventario, en las cinco cuencas correspondientes al área de estudio, se observa que el mayor número de glaciares se encuentra en la cuenca del río Maipo, el cual representa el 41% del total de glaciares inventariados. La cuenca del río Aconcagua y la cuenca del río Rapel representan el 21% y el 28% de glaciares respectivamente. La cuenca del río Maule tiene el 6% de glaciares inventariados en el área de estudio y la cuenca del río Mataquito representa el 3% de los glaciares en este inventario. El mayor número de glaciares rocosos se encuentran en la cuenca del río Aconcagua y la cuenca del río Maipo. A diferencia de las cuencas del río Mataquito y Maule, donde el porcentaje de glaciares rocosos no sobrepasa el 10% de glaciares rocosos en el área de estudio.

Las rampas de protilus se encuentran mayoritariamente en la cuenca del río Maipo y Rapel, con un 71% y un 18% respectivamente. La cuenca del río Aconcagua representa un 10% del área de estudio y el resto de las cuencas no poseen rampas de protilus.

Los glaciares de valle se concentran exclusivamente en la cuenca del río Maipo y Rapel. La cuenca del río Maipo representa un 52% del total de glaciares inventariados y la cuenca del río Rapel un 48%. En la cuenca del río Mataquito y Maule no se encuentran glaciares de valle. Queda fuera del análisis la cuenca del río Aconcagua, pues sólo se catastraron los glaciares rocosos, como se ha mencionado con anterioridad.

La cuenca del río Maipo presenta la mayor superficie de glaciares junto a la cuenca del río Rapel. La cuenca del Río Maipo presenta el 51% de la superficie inventariada en el área de estudio y la cuenca del río Rapel representa el 33% del total de la superficie de glaciares inventariados. Maule y Mataquito tienen un 2% y un 3% de superficie inventariada respectivamente.

Respecto a los estudios y monitoreos realizados en el glaciar Universidad se debe mencionar que la falta de datos de la AWS no permitió calcular y estimar el balance calórico del glaciar.

La ablación medida en la superficie del glaciar, se realizó durante un periodo de control de 97 días en las estacas instaladas en la zona alta y baja del glaciar. Estos sectores en que se dividió el glaciar, ha sido para efectos de estimar el balance de masa.

En relación a las campañas exploratorias para determinar puntos de aforo se puede concluir que los glaciares elegidos cumplen con el requisito de representatividad respecto a su cuenca, respecto a su tamaño y son glaciares que permiten el acceso a los glaciares. Respecto a los peligros que podrían afectar estos puntos de aforo son las crecidas asociadas a altas tasas de fusión del manto de nieve y del glaciar, en las épocas de primavera y verano, probablemente con arrastre de material detrítico, peligros de eventos sísmicos, fuertes vientos y tormentas tanto en invierno como en verano y finalmente la cubierta y carga del manto de nieve invernal. En el caso del punto de aforo propuesto para la cuenca del Río Aconcagua se agrega el peligro de inestabilidad, muy local, del talud en material morrénico erosionado por el cauce de agua que baja por la quebrada en que se ubica el propuesto punto de aforo. En el caso de la cuenca del Río Maule se agrega como peligro una posible reactivación del Volcán Pellado, el cual se encuentra el glaciar.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- BARCAZA, G.; ANIYA, M. 2007. *Applications of remote sensing to glacier studies*. SEPPYO 69 (2): p.201-220.
- BARSCH, D. 1996. Rock-glaciers. En Douglas, I. y Tempe, M. (eds.) Springer, 1966 Berlin. 331 p.
- BOWN, F.; RIVERA, A.; C. ACUÑA, 2008. *Recent glaciers variations at the Aconcagua basin, central Chilean Andes*. En: *Annals of Glaciology*, 48, p. 43-48.
- CEAZA, 2008. Medición del albedo de superficie de los glaciares en la zona de Pascua-Lama 23 de Octubre de 2008. (Anexo P). En: Recopilación de estudios de línea de base actualizada de la criósfera. Golder Associates 217 p.
- CHEN, J; OHMURA, A. Estimation of Alpine glacier water resources and their change since the 1870s. Hydrology in Mountainous Regions. I - Hydrological Measurements; the Water Cycle (Proceedings of two Lausanne Symposia, August 1990). IAHS Publ. no. 193, 1990.p. 127-135
- CHUVIECO, E. Fundamentos de teledetección espacial. 1996. 568 p.
- GLIMS Algorithm Working Group. GLIMS algorithm document. 2006. Disponible en: <http://www.geo.unizh.ch/~kaeaeb/glims/algor.html>
- GONZALEZ, J. Modelling the energy balance of high altitude glacierised basins in the Central Andes. The University of Edinburg. 175 p.
- NOVEROY, C. Inventario de Glaciares de la hoya del río Mataquito. Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas. Publicación Interna. EH 87/1, Santiago, 1987. 125 p.
- MARANGUNIC, C. Inventario de Glaciares. Hoya del río Maipo. Dirección General de Aguas, Publicación G-2, Santiago, 1979.65 p.
- MARANGUNIC, C.; MARAGUNIC, P. 2010. International Glaciological Conference **VICC 2010 "Ice and Climate Change: A View from the South"**. Poster Presentation. Valdivia, Chile, Febrero 2010. Disponible en el centro de estudios científicos, CECS.
- MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE (Ex Conama). Política para la protección y conservación de glaciares. Santiago, 2009. 9 p. Disponible en: [http://www.ecosistemas.cl/1776/articles-85952\\_recurso\\_1.pdf](http://www.ecosistemas.cl/1776/articles-85952_recurso_1.pdf)
- MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS. Estrategia Nacional de Glaciares. Unidad de Glaciología y Nieves, Centro de Estudios Científicos DGA, 2009. SIT N°205. Disponible en el centro de documentación de la DGA. Disponible en: [www.dga.cl](http://www.dga.cl)

- MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS. Manual de Carreteras. Junio.2002 Disponible en:  
[http://servicios.vialidad.cl/areasde\\_vialidad/man\\_de\\_carreteras/VOL%20N%C2%B03%20-%20MAR.2008%20-%20INDICE.pdf](http://servicios.vialidad.cl/areasde_vialidad/man_de_carreteras/VOL%20N%C2%B03%20-%20MAR.2008%20-%20INDICE.pdf)
- MÜLLER, F., CAFLISCH, T.; MÜLLER, G. (Eds.). Instructions for the compilation and assemblage of data for a world glacier inventory. IAHS(ICSI)/UNESCO report, Temporal Technical Secretariat for the World Glacier Inventory (TTS/WGI), ETH Zurich, Switzerland. 1977. 19 p. y apéndices
- MÜLLER, F. (Ed.). *Instructions for the compilation and assemblage of data for a world glacier inventory; Supplement: Identification/glacier number IAHS(ICSI)/UNEP/UNESCO report, Temporal Technical Secretariat for the World Glacier Inventory (TTS/WGI), ETH Zurich, Switzerland.* 1978
- RAU, F., MAUZ, F., VOGT, S., KHALSA, J.S. and RAUP, B. 2005. Illustrated GLIMS glacier classification manual. Glacier classification guidance for the GLIMS Inventory. NSIDC: 36 p.
- RAUP, B., and KHALSA, J.S. 2006. GLIMS analysis tutorial. Draft, 20060919. 13p.
- UNESCO. Perennial ice and snow masses – a guide for compilation and assemblage of data for the World Glacier Inventory. En: Technical Papers in Hydrology No. 1. 1970. Paris, Francia. 59 p.
- UNESCO (1970): Perennial ice and snow masses – a guide for compilation and assemblage of data for the World Glacier Inventory. Technical Papers in Hydrology No. 1
- USGS, 1999. *Glaciers of South America. Satellite Image Atlas of glaciers of the world.* En: *Williams, R.S., Ferrigno, J.G. (Eds.), United States Geological Survey (USGS) Professional Paper 1386-I.* 1206 p.
- VALDIVIA, P. Inventario de Glaciares, Andes de Chile Central (32°-35° lat. S). Hoyas de los ríos Aconcagua, Maipo, Cachapoal y Tinguiririca. En: Jornadas de Hidrología de Nieves y Hielos en América del Sur. Programa Hidrológico Internacional, Santiago de Chile, 1984 1: 6.1-6. 24.
- VIVERO, S; RIVERA, A. Inventario de Glaciares del Volcán Melimoyu, zona volcánica del sur. Proyecto FONDECYT 1090387. Santiago, Chile. 2010. 15 pp. Disponible en: [http://www.lars.cl/biblioteca/ST3\\_188%20Sebastian%20Vivero.pdf](http://www.lars.cl/biblioteca/ST3_188%20Sebastian%20Vivero.pdf)
- WORLD GLACIER MONITORING SERVICE, compiler. World Glacier Inventory Status 1988. Wallingford, Oxfordshire, UK: International Association of Hydrological Sciences; Nairobi, Kenya: Global Environment Monitoring System of the United Nations Environment Programme; Paris, France: United Nations Educational, Scientific, and Cultural Organization. 1989.