



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

**“IMPLEMENTACIÓN NIVEL 2 ESTRATEGIA NACIONAL DE
GLACIARES:
MEDICIONES GLACIOLÓGICAS TERRESTRES EN CHILE
CENTRAL, ZONA SUR Y PATAGONIA”**

INFORME FINAL

**REALIZADO POR:
GEOESTUDIOS LTDA.**

S.I.T. N° 327

SANTIAGO, DICIEMBRE, 2013

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

**Ministra de Obras Públicas
Abogado Sra. Loreto Silva Rojas**

**Director General de Aguas
Abogado Sr. Francisco Echeverría Ellsworth**

**Jefe Unidad Glaciología y Nieves
Dr. Gonzalo Barcaza Sepúlveda**

**Inspector Fiscal
Sr. Alexis Segovia Rocha**

GEOESTUDIOS LTDA.

**Jefe de Proyecto
Dr. Gino Casassa Rogazinski
Dr. Cedomir Marangunic Damianovic**

Profesionales

**Geomensor Sr. Cristián Peralta Abasolo
Ing. Civil Hidráulica M.Sc. Srta. Gabriela Collao Gómez
Geólogo Sr. José Becerra Rivera
Ing. Informático Sra. Ana María Marangunic Vrsalovic
Geógrafo Martín Bustamante Domic
Ing. Forestal Sr. José Luis Rodríguez Lagos
Ing. (Ej.) Prevención de Riesgos Sra. Claudia Schönffeldt Palma
Ing. Mecánico Industrial Sr. Marcelo Arévalo González
Técnico Sr. Andrés Marangunic Vrsalovic
Técnico Sr. Andrés Middleton Merino
Técnico Nivomensor Sr. Alberto Peralta Ramírez
Técnico Nivomensor M.Sc. Sr. Rodrigo Vivanco Figueroa**

ÍNDICE

Página

1.	RESUMEN EJECUTIVO.....	1
1.1.	CONTRATO	3
1.2.	OBJETIVO GENERAL.....	3
1.3.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
2.	ZONA GLACIOLÓGICA CENTRO.....	4
2.1.	INTRODUCCIÓN.....	4
2.2.	ACTIVIDADES DE TERRENO	5
2.2.1.	Estaciones meteorológicas.....	6
2.2.1.1.	Campaña N°1 (marzo 2013).....	6
2.2.1.2.	Campaña N°2.....	9
2.2.1.3.	Campaña N°3.....	9
2.2.2.	Red de balizas de ablación	12
2.2.2.1.	Campaña N°1.....	12
2.2.2.2.	Campaña N°2.....	14
2.2.2.3.	Campaña N°3.....	14
2.2.3.	Mediciones DGPS	16
2.2.3.1.	Campaña N°1.....	16
2.2.3.1.1	Instalación equipo GNSS.....	16
2.2.3.1.2	Control de posición de balizas con equipo GNSS.....	17
2.2.3.2.	Campaña N°2.....	22
2.2.3.3.	Campaña N°3.....	24
2.3.	VELOCIDAD DE MOVIMIENTO.....	29
2.4.	METEOROLOGÍA	34
2.4.1.	Temperatura del aire.....	34
2.4.2.	Humedad relativa.....	35
2.4.3.	Presión atmosférica	36
2.4.4.	Velocidad y dirección del viento	37
2.4.5.	Altura de nieve	39
2.4.6.	Radiación de onda corta.....	40
2.4.7.	Radiación de onda larga.....	41
2.5.	BALANCES	42
2.5.1.	Balance glaciológico	42
2.5.2.	Balance geodésico.....	48
2.5.3.	Balance de energía.....	61
2.5.3.1.	Balance de energía en el glaciar Bello otoño 2013.....	61
2.5.3.2.	Balance de energía en el glaciar Bello y Yeso primavera 2013.....	67
3.	ZONA GLACIOLÓGICA SUR A.....	78
3.1.	INTRODUCCIÓN.....	78

3.2.	ACTIVIDADES DE TERRENO	81
3.2.1.	Instalación y control de balizas	82
3.2.1.1.	Campaña N°1	82
3.2.1.2.	Campaña N°2	85
3.2.1.3.	Campaña N°3	88
3.2.1.4.	Campaña N°4	90
3.2.1.5.	Campaña N°5	93
3.2.1.6.	Campaña N°6	94
3.2.1.7.	Campaña N°7	96
3.2.2.	Estación fluviométrica y aforos	100
3.2.2.1.	Instalación estación fluviométrica (otoño)	101
3.2.2.2.	Control en primavera y reinstalación	105
3.2.2.3.	Aforos	109
3.2.3.	Instalación de la estructura de la AWS	114
3.2.4.	Mediciones DGPS	118
3.2.4.1.	Campaña N°4	118
3.2.4.2.	Campaña N°7	119
3.3.	VELOCIDAD DE MOVIMIENTO	121
3.4.	BALANCE DE MASA GLACIOLÓGICO	124
3.5.	ESTUDIO DE LAHARES VOLCAN MOCHO CHOSHUENCO	128
3.5.1.	Antecedentes	128
3.5.2.	Objetivos	129
3.5.3.	Ubicación	130
3.5.4.	Metodología	132
3.5.4.1.	Metodología estimación nieve y hielo	133
3.5.4.1.1.	Metodología estimación manto de nieve	133
3.5.4.1.2.	Metodología estimación espesor de hielo	134
3.5.4.2.	Metodología estimación volumen de lahares	136
3.5.4.3.	Metodología modelización lahares	137
3.5.4.3.1.	Metodología LaharZ	137
3.5.4.3.2.	Metodología MSF	140
3.5.5.	Limitaciones	142
3.5.6.	Contexto regional	144
3.5.6.1.	Clima	145
3.5.6.2.	Precipitaciones	145
3.5.6.3.	Datos meteorológicos glaciar Mocho	147
3.5.6.4.	Contexto Geológico	150
3.5.6.5.	Basamento de los volcanes del Pleistoceno-Holoceno	150
3.5.6.5.1.	Rocas Estratificadas y metamórficas	150
3.5.6.5.2.	Rocas plutónicas	155
3.5.6.6.	Geología de los volcanes del Pleistoceno-Holoceno	157
3.5.6.6.1.	Volcán Mocho	158
3.5.6.6.2.	Volcán Choshuenco	164
3.5.6.6.3.	Centros volcánicos adventicios	165
3.5.6.6.4.	Otros volcanes del área	166
3.5.6.7.	Depósitos sedimentarios	167
3.5.6.8.	Historia Eruptiva del Volcán Mocho-Choshuenco	169
3.5.7.	Características de un Lahar	172
3.5.7.1.	Generalidades	172
3.5.7.2.	Reología de un lahar	174

3.5.7.3.	Depósitos Laháricos	176
3.5.8.	Escenarios Eruptivos Probables	178
3.5.8.1.	Escenarios 1 (1864), 2 (Ca. 1550) Y 3 (lg. Enco): Erupciones Subplinianas A Plinianas	179
3.5.8.2.	Escenario 4: Erupción efusiva	183
3.5.9.	Definición de Zonas Críticas de Riesgo	185
3.5.10.	Caracterización Lahares Volcán Mocho-Choshuenco	189
3.5.10.1.	Reología Flujos Laháricos	191
3.5.11.	Estimación de volúmenes de lahares	198
3.5.11.1.	Manto de nieve	198
3.5.11.1.1	Antecedentes y descripción del manto de nieve	198
3.5.11.1.2	Estimación del manto de nieve	200
3.5.11.2.	Glaciar	203
3.5.11.2.1	Antecedentes y descripción del glaciar	203
3.5.11.2.2	Estimación de espesores y volumen de los glaciares ..	203
3.5.11.3.	Metodología y estimación del volumen de lahares	214
3.5.11.3.1	Estimación de volumen de lahares escenarios 1 2 y 3	214
3.5.11.3.2	Estimación de volumen de lahares escenario 4.....	219
3.5.12.	Modelación de Lahares.....	223
3.5.12.1.	Elección del DEM.....	223
3.5.12.2.	Modelación con LAHARZ.....	229
3.5.12.2.1	Introducción.....	229
3.5.12.2.2	Resultados	231
3.5.12.3.	Modelación con MSF	253
3.5.12.3.1	Introducción.....	253
3.5.12.3.2	Resultados	255
3.5.13.	Conclusiones	271
4.	ZONA GLACIOLÓGICA AUSTRAL	282
4.1.	INTRODUCCIÓN.....	282
4.2.	GLACIAR EXPLORADORES.....	283
4.2.1.	Trabajos de terreno.....	283
4.2.1.1.	Instalación y control de Balizas.....	283
4.2.1.1.1	Campaña N°1	283
4.2.1.1.2	Campaña N°2	284
4.2.1.1.3	Campaña N°3	285
4.2.1.2.	Mediciones DGPS	287
4.2.1.2.1	Campaña N°1	287
4.2.1.2.2	Campaña N°2	291
4.2.1.2.3	Campaña N°3	292
4.2.2.	Estación meteorológica y transmisión Iridium	294
4.2.2.1.	Campaña N°1	294
4.2.2.2.	CampañaN°2.....	294
4.2.2.3.	Campaña N°3	295
4.2.3.	Velocidad de movimiento	296
4.2.4.	Meteorología	299
4.2.4.1.	Temperatura del aire	301
4.2.4.2.	Humedad relativa.....	302
4.2.4.3.	Presión atmosférica	303
4.2.4.4.	Velocidad y dirección del viento	304
4.2.4.5.	Altura de nieve	307

4.2.4.6.	Radiación de onda corta.....	307
4.2.4.7.	Radiación de onda larga.....	309
4.2.5.	Balances.....	310
4.2.5.1.	Balance glaciológico.....	310
4.2.5.2.	Balance de energía.....	314
4.3.	GLACIAR TYNDALL.....	319
4.3.1.	Trabajos de terreno.....	319
4.3.1.1.	Instalación y control de Balizas.....	320
4.3.1.1.1	Campaña N°1.....	320
4.3.1.1.2	Campaña N°2.....	321
4.3.1.1.3	Campaña N°3.....	322
4.3.1.2.	Mediciones DGPS.....	325
4.3.1.2.1	Campaña N°1.....	325
4.3.1.2.2	Campaña N°2.....	328
4.3.1.2.3	Campaña N°3.....	331
4.3.1.3.	Estación meteorológica y transmisión Iridium.....	332
4.3.1.3.1	Campaña N°1.....	332
4.3.1.3.2	Campaña N°2.....	333
4.3.1.3.3	Campaña N°3.....	333
4.3.1.4.	Cámaras fotográficas secuenciales.....	335
4.3.1.4.1	Instalación de cámaras automáticas.....	335
4.3.2.	Velocidad de movimiento.....	341
4.3.3.	Meteorología.....	345
4.3.3.1.	Temperatura del aire.....	347
4.3.3.2.	Humedad relativa.....	347
4.3.3.3.	Presión atmosférica.....	348
4.3.3.4.	Velocidad y dirección del viento.....	349
4.3.3.5.	Altura de nieve.....	350
4.3.3.6.	Radiación de onda corta.....	351
4.3.3.7.	Radiación de onda larga.....	351
4.3.4.	Fluviometría.....	352
4.3.5.	Balances.....	358
4.3.5.1.	Balance glaciológico.....	358
4.3.5.2.	Balance de energía.....	360
5.	CAPACITACIONES.....	367
5.1.	IRIDIUM.....	367
5.2.	ZONIFICACIÓN DE RIESGOS Y MODELACIÓN DE LAHARES.....	368
6.	CARACTERÍSTICAS Y DETALLES PARA LA IMPLEMENTACIÓN Y OPERACIÓN DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN SATELITAL DE DATOS.....	371
6.1.	CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN SATELITAL ..	371
6.2.	COSTOS DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN.....	373
6.3.	CONSUMO DE ENERGÍA DE ESTACIONES.....	374
6.4.	PROGRAMACIÓN DEL SISTEMA.....	375
6.5.	CODIFICACIÓN BINARIA UTILIZADA PARA LA TRANSMISIÓN DE DATOS.....	376
6.6.	INSTALACIÓN DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN.....	377
6.6.1.	Conexión del modem y antena.....	377

6.6.2.	Programa	377
6.7.	RECUPERACIÓN DE DATOS	380
6.7.1.	Recuperación de datos desde la página web	380
6.7.2.	Recuperación de datos desde MSI a través de un Script	382
6.7.2.1.	Funcionamiento del script.	383
6.7.2.2.	Proceso para cada estación.	383
6.7.2.3.	Preparar msiDataSync para la ubicación de archivos y el conjunto de módems.	384
6.8.	CHEQUEO DE OPERACIÓN	385
7.	ASESORAMIENTO TECNICO EN LA RED GLACIOLÓGICA DE MONTAÑA	386
7.1.	INTRODUCCIÓN.....	386
7.2.	ESTRATEGIA NACIONAL DE GLACIARES	386
7.3.	RECOMENDACIONES SOBRE LA RED DE MONITOREO DE GLACIARES.....	388
7.3.1.	Zona Norte.....	389
7.3.2.	Zona Centro	390
7.3.3.	Zona Sur.....	391
7.3.4.	Zona Austral.....	391
7.3.4.1.	Glaciar Exploradores.....	392
7.3.4.2.	Glaciar Tyndall.....	392
7.4.	ANÁLISIS CRÍTICO DE LA ESTRATEGIA NACIONAL DE GLACIARES.....	393
8.	SEGURIDAD DEL TRABAJO.....	393
8.1.	ANÁLISIS DE SEGURIDAD EN EL TRABAJO (AST).....	393
8.1.1.	Glaciar Bello	394
8.1.2.	Glaciar Yeso	397
8.1.3.	Glaciar Mocho-Choshuenco.....	400
8.1.4.	Glaciar Exploradores.....	404
8.1.5.	Glaciar Tyndall.....	410
8.2.	HOJA DE CONTROL DE RIESGOS	416
8.3.	FLUJOGRAMA DE EMERGENCIAS.....	418
8.4.	CAPACITACIÓN.....	419
9.	BIBLIOGRAFÍA.....	420
10.	ANEXOS	428
10.1	ESTACIONES DE MUESTREO DE AFLORAMIENTOS DE LAHARES	428
10.2	ANEXOS DIGITALES (en CD)	451

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1-A. Ubicación Glaciares Bello y Yeso. Fuente de la imagen: Word View 2, marzo 2010.	5
Fig. 2.2.1.1-A. Estación meteorológica GEUS, con su configuración y emplazamiento definitivo, glaciar Bello.	8
Fig. 2.2.1.1-B. Emplazamiento de la estación meteorológica Trípode instalada en el margen occidental del glaciar Yeso.	8
Fig. 2.2.1.1-C. En la imagen Google Earth se observa el emplazamiento de las estaciones meteorológicas automáticas en los glaciares Bello (izquierda) y Yeso (derecha).	9
Fig. 2.2.1.3-A. En la imagen se observa la estación GEUS en el glaciar Bello con el marco de ablación correspondiente.	10
Fig. 2.2.1.3-B. En la imagen se observa la estación GEUS en el glaciar Yeso con el marco de ablación correspondiente.	11
Fig. 2.2.1.3-C. Estación Vaisala ubicada en el margen del glaciar Yeso.	11
Fig. 2.2.2.1-A. Perforación manual en el hielo para instalación de baliza en el glaciar Bello con el taladro Ice Auger de Kovacs.	13
Fig. 2.2.3.1.1-A. Receptor GNSS Trimble R6 y batería de alimentación instalado sobre roca sólida junto al campamento base.	16
Fig. 2.2.3.1.2-A. Personal de Geoestudios en el glaciar Bello durante la grabación de datos desde el controlador del receptor GNSS. Se observa el receptor GNSS instalado sobre el trípode y base nivelante.	18
Fig. 2.2.3.1.2-B. Ubicación de las balizas en el glaciar Bello.	20
Fig. 2.2.3.1.2-C. Ubicación de las balizas en el glaciar Yeso.	21
Fig. 2.2.3.1.2-D. Ubicación de balizas y levantamientos GNSS cinemáticos (línea roja) en los glaciares Bello y Yeso.	22
Fig. 2.2.3.3-A. En la imagen se observa el receptor GPS móvil ubicado en la baliza T7 del glaciar Yeso.	24
Fig. 2.2.3.3-B. Ubicación de las balizas instaladas el mes de noviembre de 2013 en el glaciar Bello. La imagen corresponde a una ortofoto LIDAR de Digimapas del 22-24 de abril de 2012.	25
Fig. 2.2.3.3-C. Ubicación de las balizas instaladas el mes de noviembre de 2013 en el glaciar Yeso. La imagen corresponde a una ortofoto LIDAR de Digimapas del 22-24 de abril de 2012.	26
Fig. 2.2.3.3-D. Levantamiento cinemático realizado el mes de noviembre de 2013 en el glaciar Bello. La imagen corresponde a una ortofoto LIDAR de Digimapas del 22-24 de abril de 2012.	28
Fig. 2.3-A. Vectores de velocidad medidos en la superficie de los glaciares Bello y Yeso, entre marzo de 2013 y abril de 2013. Fuente de la imagen: Bing Maps.	33
Fig. 2.4.1-A. Temperatura del aire promedio hora en las estaciones Bello y Yeso.	35
Fig. 2.4.2-A. Humedad relativa promedio hora en las estaciones Bello y Yeso.	36

Fig. 2.4.3-A. Presión atmosférica promedio hora en las estaciones Bello y Yeso.	37
Fig. 2.4.4-A. Velocidad del viento promedio hora en las estaciones Bello y Yeso.	38
Fig. 2.4.4-B. Rosa de los vientos estación Bello.	38
Fig. 2.4.4-C. Rosa de los vientos estación Yeso.	38
Fig. 2.4.4-D. Rosa de los vientos en las estaciones Bello y Yeso. Fuente de la imagen: Google Earth.	39
Fig. 2.4.5-A. Altura de nieve promedio hora en la estación Bello.	40
Fig. 2.4.6-A. Radiación de onda corta incidente (inc.) y reflejada (ref.) promedio hora en la estación Bello.	41
Fig. 2.4.7-A. Radiación de onda larga incidente (inc.) y emitida (emi.) promedio hora en la estación Bello.	42
Fig. 2.5.1-A. Ubicación de las balizas en glaciar Bello. Fuente de la imagen: Bing Maps. 45	
Fig. 2.5.1-B. Ubicación de las balizas en glaciar Yeso. Fuente de la imagen: Bing Maps. 46	
Fig. 2.5.1-C. Polígonos de Thiessen creados para la extrapolación de datos en los glaciares Bello y Yeso. Imagen de fondo Worldview 2, Marzo 2010.	47
Fig. 2.5.2-A. Curvas de nivel obtenidas para el glaciar Yeso a partir del levantamiento LIDAR de abril de 2012. En color verde el levantamiento DGPS cinemático realizado en marzo de 2013.	49
Fig. 2.5.2-B. En color rojo el levantamiento cinemático DGPS realizado en marzo de 2013 sobre el glaciar Yeso y en cian el TIN generado a partir de las curvas de nivel obtenidas del levantamiento LIDAR de abril de 2012.	50
Fig. 2.5.2-C. Curvas de nivel obtenidas a partir del levantamiento LIDAR en abril de 2012 en el glaciar Bello. En color verde el levantamiento cinemático realizado en marzo de 2013 y en azul el levantamiento cinemático de noviembre de 2013.	51
Fig. 2.5.2-D. En color rojo el levantamiento DGPS cinemático realizado en marzo de 2013 en el glaciar Bello, en azul el levantamiento cinemático DGPS de noviembre de 2013 y en cian el TIN generado a partir de las curvas de nivel obtenidas del levantamiento LIDAR de abril de 2012.	52
Fig. 2.5.2-E. Curvas de nivel originales con un intervalo de 1 m (color naranja), el TIN creado (color cian), y los puntos del levantamiento cinemático (cruces de color rojo a la izquierda) para el sector de la baliza YT9 del glaciar Yeso. El borde derecho inferior del TIN y las curvas de nivel corresponde al margen oriental del glaciar Bello según los datos del levantamiento LIDAR de abril de 2012, vale decir el color blanco indica terreno desglaciado.	53
Fig. 2.5.2-F. Diferencia de cota (m) entre el levantamiento DGPS de marzo de 2013 y el LIDAR de abril de 2012, glaciar Bello.	54
Fig. 2.5.2-G. Diferencia de cota (m) entre el levantamiento DGPS de noviembre de 2013 y el LIDAR de abril de 2012, glaciar Bello.	55
Fig. 2.5.2-H. Diferencia de cota (m) entre el levantamiento DGPS de marzo de 2013 y el LIDAR de abril de 2012, glaciar Yeso.	56
Fig. 2.5.2-I. Correlación de la diferencia de cota (ΔH) (eje de ordenadas) con la cota del levantamiento DGPS de marzo de 2013 (eje de abscisas), glaciar Bello.	57

Fig. 2.5.2-J. Correlación diferencia de cota (ΔH) (eje de ordenadas) con la cota del levantamiento DGPS de noviembre de 2013 (eje de abscisas), glaciar Bello.	58
Fig. 2.5.2-K. Correlación diferencia de cota (ΔH) (eje de ordenadas) con la cota del levantamiento DGPS de marzo de 2013 (eje de abscisas), glaciar Yeso.	58
Fig. 2.5.2-L. División del glaciar Yeso en franjas para el cálculo del balance de masa geodésico.	60
Fig. 2.5.3.1-A. Albedo promedio horario.	62
Fig. 2.5.3.1-B. Flujos de energía promedio horario.	66
Fig. 2.5.3.1-C. Energía disponible para la fusión promedio horario.	66
Fig. 2.5.3.2-A. Temperatura promedio horaria medida en la estación en el glaciar Bello y Yeso en noviembre 2013.	69
Fig. 2.5.3.2-B. Humedad relativa promedio horaria medida en la estación en el glaciar Bello y Yeso en noviembre 2013.	69
Fig. 2.5.3.2-C. Velocidad del viento promedio horaria medida en la estación en el glaciar Bello y Yeso en noviembre 2013.	70
Fig. 2.5.3.2-D. Radiación de onda corta incidente y reflejada promedio horaria medida en la estación en el glaciar Bello en noviembre 2013.	70
Fig. 2.5.3.2-E. Radiación de onda corta incidente y reflejada promedio horaria medida en la estación en el glaciar Yeso en noviembre 2013.	71
Fig. 2.5.3.2-F. Albedo promedio horario medida en la estación en el glaciar Bello y Yeso en noviembre 2013.	71
Fig. 2.5.3.2-G. Radiación de onda larga incidente y emitida promedio horaria medida en la estación en el glaciar Bello en noviembre 2013.	72
Fig. 2.5.3.2-H. Radiación de onda larga incidente y emitida promedio horaria medida en la estación en el glaciar Yeso en noviembre 2013.	72
Fig. 2.5.3.2-I. (a) Flujos de energía promedio diarios en el glaciar Bello, (b) la energía disponible para la fusión en el glaciar Bello y (c) la ablación horaria estimada con el balance de energía y medida en la estación meteorológica en el glaciar Bello.	76
Fig. 2.5.3.2-J. (a) Flujos de energía promedio diarios en el glaciar Yeso, (b) la energía disponible para la fusión en el glaciar Yeso y (c) la ablación horaria estimada con el balance de energía y medida en la estación meteorológica en el glaciar Yeso, la línea roja representa el valor estimado de la ablación promedio medida sin errores.	77
Fig. 3.1-A. Variaciones de área del glaciar en el Volcán Mocho – Choshuenco (Rivera et al., 2005).	79
Fig. 3.1-B. Cuenca del glaciar Mocho en azul, volcán Mocho-Choshuenco, zona glaciológica Sur A. B01 a B21 indican la ubicación existente de las balizas. Fuente de la imagen: Google Earth.	80
Fig. 3.2.1.1-A. Glaciar sur-oriental del volcán Mocho-Choshuenco, sector baliza B13.	82
Fig. 3.2.1.2-A. Balizas de ablación (PVC) y acumulación (aluminio) en B12.	86
Fig. 3.2.1.3-A. Baliza de acumulación (aluminio) en B10.	89
Fig. 3.2.1.4-A. Medición con DGPS en B11.	91

Fig. 3.2.1.4-B. Baliza de acumulación (aluminio) en B03.	93
Fig. 3.2.1.6-A. Baliza de acumulación (aluminio) en B17.	95
Fig. 3.2.1.7-A. Instalación de balizas en el glaciar del volcán Mocho.	96
Fig. 3.2.1.7-B. Control de balizas de acumulación (aluminio) en el volcán Mocho. Inmediatamente a la derecha se observa una baliza de PVC naranja de ablación.	97
Fig. 3.2.2-A Ubicación estación fluviométrica.	100
Fig. 3.2.2.1-A. Caseta del data logger.	102
Fig. 3.2.2.1-B. Data logger CR 800.	102
Fig. 3.2.2.1-C. Panel solar instalado y conectado a la caseta del data logger.	103
Fig. 3.2.2.1-D. Regulador de voltaje del panel solar.	103
Fig. 3.2.2.1-E. Tubo porta sensor de presión y limnómetro.	104
Fig. 3.2.2.1-F. Tubería de protección del cable del sensor de presión.	105
Fig. 3.2.2.2-A. Estado en que se encontró el equipo dentro de la caja.	106
Fig. 3.2.2.2-B. Anclajes cortados del tubo protector para el cable del sensor.	106
Fig. 3.2.2.2-C. Disposición del equipo de reemplazo dentro de las cajas de protección.	107
Fig. 3.2.2.2-D. Modificación a los tubos de protección del sensor.	108
Fig. 3.2.2.2-E. Equipo completo en su ubicación definitiva y en funcionamiento.	108
Fig. 3.2.2.3-A. Sección de aforo donde se realizó la medición de caudal con molinete.	109
Fig. 3.2.2.3-B. Sección de Aforo en estero Norte del glaciar Mocho registrada el 21 de noviembre de 2013.	113
Fig. 3.2.2.3-C. Curva de Gasto en estero Norte del glaciar Mocho.	114
Fig. 3.2.3-A. Vista desde aguas abajo de las estructuras terminadas.	115
Fig. 3.2.3-B. Vista desde aguas arriba de las estructuras terminadas.	116
Fig. 3.2.3-C. Vista de la caja usada para almacenar baterías, tubería para cables, y perfil para asegurar la tapa.	116
Fig. 3.2.3-D. Vista del mástil y caja para data logger.	117
Fig. 3.2.3-E. Caja para data logger y terminales de tubos flexibles.	117
Fig. 3.2.4.2-A. Estación base GNSS glaciar Mocho (BMCH).	119
Fig. 3.2.4.2-B. GNSS móvil montado sobre la baliza de ablación B10.	120
Fig. 3.3-A. Vectores de velocidad medidos en la superficie del glaciar Mocho en la campaña 7 ^a . La imagen satelital es Landsat 2010.	123
Fig. 3.4-A. Distribución de balizas en la cuenca del glaciar Mocho. Imagen de fondo Landsat 8 OLI del 18 de abril de 2013.	124
Fig. 3.4-B. Mediciones de densidad de nieve en calicata.	125
Fig. 3.4-C. Ajuste de polinomio de tercer orden a los datos de densidad (d) medidos en terreno en B03 (cumbre) y en B18. El eje de ordenadas representa la densidad en g/cm^3 y las abscisas el mes (enero = 1, diciembre = 12).	127

Fig. 3.5.3-A. Ubicación área de estudio.	131
Fig. 3.5.4.3.1-A. Sección transversal (A) y planimétrica (B) definidas para un lahar, se utilizan en el programa LAHARZ. La razón H/L describe el alcance de la zona de peligro proximal, a partir del cual comienza la depositación en la simulación (Schilling, 1998).	138
Fig. 3.5.6.2-A. Ubicación de las estaciones meteorológicas y pluviométricas.	146
Fig. 3.5.6.2-B. Variación mensual de la precipitación.	147
Fig. 3.5.6.3-A. Temperatura media mensual, volcán Mocho- Choshuenco 2006 (fuente: Escobar, tesis doctoral).	148
Fig. 3.5.6.3-B. Medias mensuales de Humedad Relativa, volcán Mocho-Choshuenco (rojo) v/s El Tepual (radiosonda de Puerto Montt) (azul), febrero a noviembre 2006 (fuente: Escobar, tesis doctoral).	149
Fig. 3.5.6.3-C. Radiación directa, media mensual (MJ/m ²), volcán Mocho- Choshuenco 2006 (fuente: Escobar, tesis doctoral).	149
Fig. 3.5.6.5.1-A. Mapa geológico del complejo volcánico Mocho-Choshuenco (Moreno y Lara, 2007).	152
Fig. 3.5.6.5.1-B. Leyenda de la Fig. 3.5.6.5.1-A.	153
Fig. 3.5.8.1-A. Imagen en la cabecera del río Mocho, al sudeste del volcán donde se aprecia el alto grado de fracturamiento del glaciar (fuente: Geoestudios, mayo 2013).	181
Fig. 3.5.8.2-A. Ejemplo de erupción de coladas de lava fluyendo sobre hielo y dividiéndose en diferentes ramas. Obsérvese la amplia depresión formada en el hielo. Volcán Veniaminof, Alaska. Erupción de 1983 (fuente USGS).	185
Fig. 3.5.9-A. División del complejo volcánico Mocho-Choshuenco en cuencas de los principales cauces que descienden por sus laderas con indicación de los principales núcleos habitados, carreteras principales e infraestructura ubicada en la zona (sectores Este, Norte y Oeste).	186
Fig. 3.5.9-B. División del complejo volcánico Mocho-Choshuenco en cuencas de los principales cauces que descienden por sus laderas con indicación de los principales núcleos habitados, carreteras principales e infraestructura ubicada en la zona (valle del río Blanco-Pillanleufú).	187
Fig. 3.5.10-A. Ubicación de las localidades tomadas al este, norte y oeste del complejo volcánico.	190
Fig. 3.5.10-B. Ubicación de las localidades (puntos de muestreo) tomadas en el valle del río Blanco Pillanleufú.	191
Fig. 3.5.10.1-A. Localidad 1 donde se observan sedimentos laháricos. Parte alta de la cuenca del río Triful.	193
Fig. 3.5.10.1-B. Localidad 11 donde se observan sedimentos laháricos formando un nivel aterrazado junto al río Blanco (sector refugio universidad Austral).	193
Fig. 3.5.10.1-C. Localidad 14 donde se observan sedimentos laháricos en el sector del estero Punahue.	194
Fig. 3.5.10.1-D. Localidad 18 donde se observan sedimentos laháricos de flujo hiperconcentrado en el valle del río Blanco-Pillanleufú.	195

Fig. 3.5.10.1-E. Localidad 23 donde se observan sedimentos laháricos en el valle del río Blanco-Pillanleufú.	196
Fig. 3.5.11.1.1-A. Franjas de 200 m de cota en las que se ha subdividido el manto de nieve invernal.	199
Fig. 3.5.11.1.2-A: Correlación acumulación media por franjas con la cota.	201
Fig. 3.5.11.2.2-A. Datos utilizados en la interpolación y procedencia de los datos.	206
Fig. 3.5.11.2.2-B. Datos de espesor de hielo utilizados en la interpolación.	207
Fig. 3.5.11.2.2-C. Topografía del fondo de la caldera obtenida con interpolación <i>natural neighbor</i> (vista desde el Sudeste hacia el Noroeste), volcán Mocho en primer plano y volcán Choshuenco al fondo.	208
Fig. 3.5.11.3.2-A. Rutas de coladas simuladas.	220
Fig. 3.5.11.3.2-B. Coladas simuladas y estimación área fundida.	221
Fig. 3.5.12.1-A. Error que se genera al interpolar en zonas con curvas de nivel sinuosas y separas entre sí (fuente Castruccio. 2008).	225
Fig. 3.5.12.1-B. Error que se genera en zonas llanas con curvas de nivel demasiado espaciadas (fuente Castruccio. 2008).	226
Fig. 3.5.12.1-C. Diferencia de cota entre el DEM "TopoToRaster" y el generado a partir de TIN (sector sudeste).	228
Fig. 3.5.12.2.1-A. Sección transversal (A) y planimétrica (B) definidas para un lahar, que se utilizan en el programa LAHARZ. La razón H/L describe el alcance de la zona de peligro proximal, a partir del cual comienza la depositación en la simulación (de Schilling. 1998).	229
Fig. 3.5.12.2.2-A. Zonas de inundación modeladas en el sector de Enco para un escenario tipo 1 (erupción vulcaniana tipo 1864).	233
Fig. 3.5.12.2.2-B. Zonas de inundación modeladas en el sector Norte del volcán para un escenario tipo 1 (erupción vulcaniana tipo 1864).	234
Fig. 3.5.12.2.2-C. Zonas de inundación modeladas en el sector Este-Sudeste (curso medio-alto) del volcán para un escenario tipo 1 (erupción vulcaniana tipo 1864).	236
Fig. 3.5.12.2.2-D. Zonas de inundación modeladas en el sector Este-Sudeste (curso bajo) del volcán para un escenario tipo 1 (erupción vulcaniana tipo 1864).	238
Fig. 3.5.12.2.2-E. Zonas de inundación modeladas en el sector de Enco para un escenario tipo 2 (erupción vulcaniana tipo ca. 1550).	239
Fig. 3.5.12.2.2-F. Zonas de inundación modeladas en el sector Norte del volcán para un escenario tipo 2 (erupción vulcaniana tipo ca. 1550).	240
Fig. 3.5.12.2.2-G. Zonas de inundación modeladas en el sector Este-Sudeste (curso medio-alto) del volcán para un escenario tipo 2 (erupción vulcaniana tipo ca. 1550). ...	241
Fig. 3.5.12.2.2-H. Zonas de inundación modeladas en el sector Este-Sudeste (curso bajo) del volcán para un escenario tipo 2 (erupción vulcaniana tipo ca. 1550).	243
Fig. 3.5.12.2.2-I. Zonas de inundación modeladas en el sector de Enco para un escenario tipo 3 (erupción vulcaniana-pliniana tipo Enco).	244

Fig. 3.5.12.2.2-J. Zonas de inundación modeladas en el sector Norte del volcán para un escenario tipo 3 (erupción vulcaniana-pliniana tipo Enco).	245
Fig. 3.5.12.2.2-K. Zonas de inundación modeladas en el sector Este-Sudeste (curso medio-alto) del volcán para escenario tipo 3 (erupción vulcaniana-pliniana tipo Enco).	246
Fig. 3.5.12.2.2-L. Zonas de inundación modeladas en el sector Este-Sudeste (curso bajo) del volcán para un escenario tipo 3 (erupción vulcaniana-pliniana tipo Enco).	247
Fig. 3.5.12.2.2-M. Zonas de inundación modeladas en el sector de Enco para un escenario tipo 4 (erupción efusiva).	249
Fig. 3.5.12.2.2-N. Zonas de inundación modeladas en el sector Norte del volcán para un escenario tipo 4 (erupción efusiva).	250
Fig. 3.5.12.2.2-Ñ. Zonas de inundación modeladas en el sector Este-Sudeste (curso medio-alto) del volcán para un escenario tipo 4 (erupción efusiva).	251
Fig. 3.5.12.2.2-O. Zonas de inundación modeladas en el sector Este-Sudeste (curso bajo) del volcán para un escenario tipo 4 (erupción efusiva).	252
Fig. 3.5.12.3.2-A. Modelación río Blanco-Enco con los demos generados a partir con TIN y con la herramienta "TopoToRaster", situando la zona de partida en la zona meridional de la cuenca.	256
Fig. 3.5.12.3.2-B. Modelación río Blanco-Enco con los demos generados a partir con TIN y con la herramienta "TopoToRaster" situando la zona de partida en la zona septentional de la cuenca.	256
Fig. 3.5.12.3.2-C. Modelación estero Pirinel.	257
Fig. 3.5.12.3.2-D. Modelación estero Punahue, zona de partida en la base del Choshuenco.	258
Fig. 3.5.12.3.2-E. Modelación estero Punahue, zona de partida más oriental.	259
Fig. 3.5.12.3.2-F. Modelación Quebrada sin nombre Norte.	261
Fig. 3.5.12.3.2-H. Modelación Quebrada Sin Nombre Noreste.	264
Fig. 3.5.12.3.2-I. Modelación río Rio Blanco Pillanleufú, sector alto.	265
Fig. 3.5.12.3.2-J. Modelación río Rio Mocho, sector alto.	267
Fig. 3.5.12.3.2-K. Modelación río Rio Chico, curso alto.	268
Fig. 3.5.12.3.2-L: Modelación río Blanco-Pillanleufú, sector medio.	269
Fig. 3.5.12.3.2-M. Modelación río Rio Blanco-Pillanleufú, sector Maihue.	270
Fig. 3.5.13-A. Zonas de inundación previstas por modelo.	273
Fig. 3.5.13-A. Zonas de inundación previstas por modelo.	275
Fig. 3.5.13-B. Mapa de peligros por lahares del volcán Mocho-Choshuenco (sector complejo volcánico).	277
Fig. 3.5.13-C. Mapa de peligros por lahares del volcán Mocho-Choshuenco (sector Mahiue).	278
Fig. 4.2.1.1.1-A. Instalación de balizas en terreno, glaciar Exploradores.	284
Fig. 4.2.1.1.2-A. Medición de balizas de ablación en el glaciar Exploradores.	284

Fig. 4.2.1.1.3-A. Perforacion con taladro a vapor e instalación de balizas de PVC en el glaciar Exploradores.....	285
Fig. 4.2.1.1.3-B. Ubicación de las balizas instaladas el mes de octubre de 2013 en el glaciar Exploradores. Fuente de imagen Bing Maps.	286
Fig. 4.2.1.2.1-A. Base GNSS (BEXP) instalada sobre un afloramiento rocoso en el margen frontal del glaciar Exploradores.	288
Fig. 4.2.1.2.1-B. Ubicación de las balizas y recorridos cinemáticos sobre el glaciar Exploradores.	290
Fig. 4.2.1.2.2-A. Vista del área de hielo descubierto en la zona de ablación en el glaciar Exploradores.	291
Fig. 4.2.1.2.3-A. DGPS móvil midiendo en modo estático en la perforación de una de las balizas del glaciar Exploradores.	292
Fig. 4.2.1.2.3-B. Ubicación de las balizas instaladas el mes de octubre de 2013 en el glaciar Exploradores. Fuente de imagen Bing Maps.	293
Fig. 4.2.2.2-A. AWS GEUS en el glaciar Exploradores. Mayo de 2013.	295
Fig. 4.2.2.3-A. En el centro de la figura se puede identificar la antena del sistema de transmisión Iridium instalada sobre el brazo de la estación meteorológica GEUS.	296
Fig. 4.2.2.3-B. En el costado derecho de la imagen, adosado a la pared interior derecha de la caja data-logger se puede apreciar el modem "Global Modem"	296
Fig. 4.2.3-A. Vectores de velocidad medidos en la superficie del glaciar Exploradores, entre Abril de 2013 y Mayo 2013. Fuente de la imagen: Google Earth.	298
Fig. 4.2.4-A. Ubicación de la estación meteorológica del Glaciar Exploradores. Fuente de la imagen: Google Earth.	300
Fig. 4.2.4-B. Estación meteorológica en glaciar Exploradores.	300
Fig. 4.2.4.1-A. Temperatura del aire aspirada promedio hora en la estación Exploradores. Primer periodo de registro.	301
Fig. 4.2.4.1-B. Temperatura del aire aspirada promedio hora en la estación Exploradores. Segundo periodo de registro.	302
Fig. 4.2.4.2-A. Humedad relativa promedio hora en la estación Exploradores.	303
Fig. 4.2.4.3-A. Presión atmosférica promedio hora en la estación Exploradores. Primer periodo de registro.	303
Fig. 4.2.4.3-B. Presión atmosférica promedio hora en la estación Exploradores. Segundo periodo de registro.	304
Fig. 4.2.4.4-A. Velocidad del viento promedio hora en la estación Exploradores. Primer periodo de registro.	305
Fig. 4.2.4.4-B. Velocidad del viento promedio hora en la estación Exploradores. Segundo periodo de registro.	305
Fig. 4.2.4.4-C. Rosa de los vientos en estación meteorológica Exploradores. Primer periodo de registro.	306
Fig. 4.2.4.4-D. Rosa de los vientos en estación Exploradores. Primer periodo de registro. Fuente de la imagen: Google Earth.	306

Fig. 4.2.4.4-E. Rosa de los vientos en estación meteorológica Exploradores. Segundo periodo de registro.	307
Fig. 4.2.4.4-F. Rosa de los vientos en estación Exploradores. Segundo periodo de registro. Fuente de la imagen: Google Earth.	307
Fig. 4.2.4.6-A. Radiación de onda corta incidente y reflejada promedio hora en la estación Exploradores. Primer periodo de registro.....	308
Fig. 4.2.4.6-B. Radiación de onda corta incidente y reflejada promedio hora en la estación Exploradores. Segundo periodo de registro.	309
Fig. 4.2.4.7-A. Radiación de onda larga incidente y emitida promedio hora en la estación Exploradores. Primer periodo de registro.	310
Fig. 4.2.4.7-B. Radiación de onda larga incidente y emitida promedio hora en la estación Exploradores. Segundo periodo de registro.	310
Fig. 4.2.5.1-A. Ubicación de las balizas en el glaciar Exploradores. Fuente de la imagen: Google Earth.....	312
Fig. 4.2.5.1-B. Polígonos de Thiessen utilizados en la zona de ablación del glaciar Exploradores. Imagen de fondo Ikonos, febrero 2011.	314
Fig. 4.2.5.2-A. Albedo promedio horario.	315
Fig. 4.2.5.2-B. Precipitación en mm/h.	316
Fig. 4.2.5.2-C. Flujos de energía promedio horario.	318
Fig. 4.2.5.2-D. Energía disponible para la fusión promedio horario.	318
Fig. 4.3.1.1.1-A. Instalación de balizas en perforaciones en hielo.	320
Fig. 4.3.1.1.2-A. Mediciones de balizas en transecta Raymond, mayo de 2013.	322
Fig. 4.3.1.1.3-A. Perforando el hielo con taladro a vapor protegido por una carpa durante la operación con condiciones de viento.	323
Fig. 4.3.1.1.3-B. Vista del interior de la carpa de protección durante la perforación en hielo.	323
Fig. 4.3.1.1.3-C. Baliza T8 recién instalada junto al taladro de hielo.....	324
Fig. 4.3.1.1.3-D. Ubicación de las balizas instaladas el mes de noviembre de 2013 en el glaciar Tyndall, sobre la transecta Japonesa. Fuente de imagen Bing Maps.	324
Fig. 4.3.1.2.1-A. Estación base GNSS (BTDL) instalada en roca firme en las cercanías del campamento base.	326
Fig. 4.3.1.2.1-B. Medición GNSS estática mediante tubo de PVC (ver texto) en puntos de balizas perforados en hielo.	326
Fig. 4.3.1.2.1-C. Medición GNSS en modo cinemático.	327
Fig. 4.3.1.2.2-A. Los círculos rojos (8 abril 2013) y azules (10 mayo 2013) representan las mediciones estáticas sobre la transecta Japonesa. los triángulos rojos (17 noviembre 2012) y azules (10 mayo 2013) las mediciones estáticas sobre la transecta Raymond. la línea roja representa el levantamiento cinemático en la transecta Japonesa (10 mayo 2013). la línea azul el levantamiento cinemático en la transecta Raymond (10 mayo 2013).	330
Fig. 4.3.1.2.2-B. Control de posición de baliza con equipo GNSS en transecta Japonesa.	330

Fig. 4.3.1.2.3-A. Distribución de las balizas instaladas sobre la transecta Japonesa en el glaciar Tyndall.....	332
Fig. 4.3.1.3.1-A. AWS GEUS instalada sobre el glaciar en la transecta Raymond levemente inclinada hacia la izquierda.....	333
Fig. 4.3.1.3.3-A. Estacion meteorológica Tyndall correctamente nivelada y con sistema de transmisión de datos funcionando.....	334
Fig. 4.3.1.3.3-B. En la figura se puede observar el modem "Global Modem" instalado a la derecha del data logger.....	334
Fig. 4.3.1.4.1-A. Ubicación de las cámaras automáticas en el glaciar Tyndall. La imagen del glaciar es de Google Earth y corresponde a marzo de 2011. La posición actual (2013) del frente del glaciar está frente a la ubicación de las cámaras.....	336
Fig. 4.3.1.4.1-B. Cámara Norte instalada a principios del mes de mayo 2013 en el frente del glaciar Tyndall, lago Geikie.....	337
Fig. 4.3.1.4.1-C. Cámara Sur instalada a principios del mes de mayo 2013. en el frente del glaciar Tyndall, lago Geikie.....	337
Fig. 4.3.1.4.1-D. Fotograma capturado por la cámara Norte instalada en el frente del glaciar Tyndall.....	338
Fig. 4.3.1.4.1-E. Cámara fotográfica secuencial Glaciar Tyndall, cámara Norte.....	339
Fig. 4.3.1.4.1-F. Cámara fotográfica secuencial glaciar Tyndall, cámara Sur.....	340
Fig. 4.3.1.4.1-G. Fotograma capturado por la cámara Norte, el día 25 de octubre 2013 a las 13:01 horas.....	340
Fig. 4.3.1.4.1-H. Fotograma capturado por la cámara Sur, el día 11 de julio 2013, a las 13:58 horas.....	341
Fig. 4.3.2-A. Vectores de velocidad medidos en la superficie del glaciar Tyndall sobre la transecta Japonesa. entre el 8 de abril y el 10 de mayo de 2013. Fuente de la imagen: Google Earth.....	343
Fig. 4.3.2-B. Vectores de velocidad medidos en la superficie del glaciar Tyndall. sobre la transecta Raymond. entre el 17 de noviembre de 2012 y el 8 de mayo de 2013. Fuente de la imagen: Google Earth.....	344
Fig. 4.3.3-A. Estación meteorológica en el glaciar Tyndall. Fuente de la imagen: Google Earth.....	346
Fig. 4.3.3-B. Estación meteorológica en el glaciar Tyndall.....	346
Fig. 4.3.3.1-A. Temperatura del aire promedio hora sensor sin aspirado y sensor aspirado en la estación Tyndall.....	347
Fig. 4.3.3.2-A. Humedad relativa promedio hora en la estación Tyndall.....	348
Fig. 4.3.3.3-A. Presión atmosférica promedio hora en la estación Tyndall.....	348
Fig. 4.3.3.4-A. Velocidad del viento promedio hora en la estación Tyndall.....	349
Fig. 4.3.3.4-B. Rosa de los vientos estación Tyndall.....	350
Fig. 4.3.3.4-C. Rosa de los vientos en la estación Tyndall. Fuente de la imagen: Google Earth.....	350
Fig. 4.3.3.6-A. Radiación de onda corta reflejada promedio hora en la estación Tyndall.....	351

Fig. 4.3.3.7-A. Radiación de onda larga incidente y emitida promedio hora en la estación Tyndall.	352
Fig. 4.3.4-A. Estaciones fluviométricas en la zona del glaciar Tyndall. Fuente de la imagen: Google Earth.	354
Fig. 4.3.4-B. Zona entre el glaciar y el lago Tyndall. Fuente: satélite Word View 2. 25 de febrero de 2012.	355
Fig. 4.3.4-C. Caudal estación fluviométrica Tyndall.	356
Fig. 4.3.4-D. Caudal estación fluviométrica Geikie.	357
Fig. 4.3.4-E. Caudal estación fluviométrica Cañadón 1.	357
Fig. 4.3.5.2-A. Precipitación estimada en la estación glaciar Tyndall sobre el hielo.	361
Fig. 4.3.5.2-B. Ubicación estaciones meteorológicas glaciar Tyndall sobre el hielo y glaciar Tyndall Roca.	361
Fig. 4.3.5.2-C. Radiación de onda corta incidente registrada en la estación glaciar Tyndall Roca y radiación de onda corta refleja registrada en la estación glaciar Tyndall en hielo.	362
Fig. 4.3.5.2-D. Albedo promedio horario en la estación glaciar Tyndall sobre el hielo.	362
Fig. 4.3.5.2-E. Flujos de energía promedio mensual.	364
Fig. 4.3.5.2-F. Flujos de energía promedios hora.	365
Fig. 5.1-A. Presentación del sistema de transmisión satelital en dependencias de Geoestudios. Fuente: DGA.	368
Fig. 5.2-A. Taller de zonificación de riesgo y modelación de lahares.	369
Fig. 5.2-B. Taller de zonificación de riesgo y modelación de lahares.	369
Fig. 6.1-A. Modem para transmisión de datos satelitales.	372
Fig. 6.6.1-A. Mapa de conexión del Global Modem.	377
Fig. 6.7.1-A. Planilla Excel con datos importados desde la página web.	382

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.2.1.1-A. Datos de instalación de las AWS en los glaciares Bello y Yeso. Coordenadas obtenidas con GPS navegador.	7
Tabla 2.2.1.3-A. Datos de instalación de las AWS en los glaciares Bello y Yeso. Coordenadas obtenidas con GPS navegador.	10
Tabla 2.2.2.1-A. Control de ablación en el glaciar Bello.	13
Tabla 2.2.2.1-B. Control de ablación en el glaciar Yeso.	14
Tabla 2.2.2.3-A. Fecha de instalación y medición de las balizas en el glaciar Bello.	15
Tabla 2.2.2.3-B. Fecha de instalación y medición de las balizas en el glaciar Yeso.	15
Tabla 2.2.3.1.2-A. Posición de las balizas en el glaciar Bello. Las coordenadas son similares a aquellas establecidas en el plan original. Coordenadas expresadas en proyección UTM huso 19 sur, sistema geodésico WGS84, altura elipsoidal (m) y altura ortométrica (m s.n.m) según el modelo geoidal EGM06.	18
Tabla 2.2.3.1.2-B. Posición de las balizas en el glaciar Yeso. Las coordenadas son similares a aquellas establecidas en el plan original. Coordenadas expresadas en proyección UTM huso 19 sur, sistema geodésico WGS84, altura elipsoidal (m) y altura ortométrica (m s.n.m) según el modelo geoidal EGM06.	19
Tabla 2.2.3.2-A. Coordenadas de las balizas en el glaciar Bello al momento del segundo control. Coordenadas expresadas en proyección UTM huso 19 sur, sistema geodésico WGS84, altura elipsoidal (m) y altura ortométrica (m s.n.m) según el modelo geoidal EGM06.	23
Tabla 2.2.3.2-B. Coordenadas de balizas en el glaciar Yeso al momento del segundo control. Coordenadas expresadas en proyección UTM huso 19 sur, sistema geodésico WGS84, altura elipsoidal (m) y altura ortométrica (m s.n.m) según el modelo geoidal EGM06.	23
Tabla 2.2.3.3-A. Ubicación de la balizas en el glaciar Bello en el mes de noviembre de 2013. Coordenadas expresadas en proyección UTM huso 19 sur, sistema geodésico WGS84, altura elipsoidal (m) y altura ortométrica (m s.n.m) según el modelo geoidal EGM06.	27
Tabla 2.2.3.3-B. Ubicación de la balizas en el glaciar Yeso en el mes de noviembre de 2013. Coordenadas expresadas en proyección UTM huso 19 sur, sistema geodésico WGS84, altura elipsoidal (m) y altura ortométrica (m s.n.m) según el modelo geoidal EGM06.	27
Tabla 2.3-A. Coordenadas de la estación base BBY1 al pie de los glaciares Bello y Yeso. “Altura” representa la altura elipsoidal según el sistema de referencia WGS 84, mientras que “Elevación” (m s.n.m.) es la altura altura ortométrica, calculada según el modelo geoidal EGM06.	30
Tabla 2.3-B. Coordenadas de las balizas sobre el glaciar Bello, al momento de su instalación a fines de marzo de 2013. Coordenadas expresadas en proyección UTM huso 19 sur, sistema geodésico WGS84.	30
Tabla 2.3-C. Coordenadas de las balizas sobre el glaciar Bello durante la segunda medición el 24 de abril de 2013, y velocidades de flujo del glaciar en el periodo marzo-	

abril de 2013. El azimut de la velocidad está referido al norte geográfico. Coordenadas expresadas en proyección UTM huso 19 sur, sistema geodésico WGS84.	31
Tabla 2.3-D. Coordenadas de las balizas sobre el glaciar Yeso al momento de su instalación a fines de marzo 2013. Coordenadas expresadas en proyección UTM huso 19 sur, sistema geodésico WGS84.....	32
Tabla 2.3-E. Coordenadas de las balizas sobre el glaciar Yeso a fines de abril 2013, y velocidades de flujo del glaciar en el periodo marzo-abril 2013. El azimut de la velocidad está referido al norte geográfico. Coordenadas expresadas en proyección UTM huso 19 sur, sistema geodésico WGS84.....	32
Tabla 2.4-A. Coordenadas de las estaciones meteorológicas en la zona glaciológica Centro, medidas con GPS tipo navegador. Coordenadas expresadas en proyección UTM huso 19 sur, sistema geodésico WGS84. Cota expresada en m s.n.m.	34
Tabla 2.5.1-A. Datos de balizas en el glaciar Bello.	44
Tabla 2.5.1-B. Datos de balizas en el glaciar Yeso.	44
Tabla 2.5.2-A. Balance de masa geodésico en los glaciares Bello y Yeso.	59
Tabla 2.5.3.1-A Flujos de energía promedio, periodo 28 de marzo a 28 de abril de 2013.65	
Tabla 2.5.3.2-A. Estaciones meteorológicas instaladas en primavera 2013, en glaciares Bello y Yeso.	68
Tabla 2.5.3.2-B. Flujos promedio de energía.	75
Tabla 2.5.3.2-C. Ablación, sublimación y fusión.....	75
Tabla 3.2.1.1-A. Medición de densidad de nieve en B03 con un tubo muestreador metálico de forma cilíndrica de 74 mm de diámetro interior.	83
Tabla 3.2.1.1-B. Medición de altura de balizas del glaciar Mocho.	84
Tabla 3.2.1.2-A. Balizas de acumulación instaladas en el glaciar Mocho.	86
Tabla 3.2.1.2-B. Medición de altura de balizas del glaciar Mocho.	87
Tabla 3.2.1.3-A. Medición de nieve acumulada con sonda de avalancha. N.D.: no disponible.....	88
Tabla 3.2.1.3-B. Medición de altura de balizas del glaciar Mocho.	90
Tabla 3.2.1.4-A. Medición de altura de balizas del glaciar Mocho.	92
Tabla 3.2.1.5-A. Medición de altura de balizas del glaciar Mocho.	94
Tabla 3.2.1.6-A. Medición de altura de balizas del glaciar Mocho.	95
Tabla 3.2.1.7-A. Medición de densidad de nieve en baliza B02 (cumbre Mocho).....	98
Tabla 3.2.1.7-B. Medición de densidad de nieve en baliza B18	98
Tabla 3.2.1.7-C. Datos de altura de las balizas existentes en el glaciar Mocho (de aluminio) y de la instalación de las nuevas balizas de ablación (de PVC). Las alturas negativas significan que el tope de la balizas quedó bajo la superficie. En todas las balizas había superficie de nieve en la época de control.....	99
Tabla 3.2.2.3-A. Aforo en otoño del caudal del estero Norte del glaciar Mocho.	110
Tabla 3.2.2.3-B. Aforo en primavera del caudal del estero Norte del glaciar Mocho.	111
Tabla 3.2.2.3-C. Control de altura del caudal del estero Norte del glaciar Mocho.....	112

Tabla 3.2.4.1-A. Coordenadas expresadas en proyección UTM huso 18 sur, sistema geodésico WGS84, altura elipsoidal (m) y altura ortométrica (m s.n.m) según el modelo geoidal EGM06.	118
Tabla 3.2.4.2-A. Coordenadas estación base glaciar Mocho (BMCH).	120
Tabla 3.2.4.2-B. Ubicación de la balizas en el glaciar Mocho, instaladas en octubre de 2013. Coordenadas expresadas en proyección UTM huso 18 sur, sistema geodésico WGS84, altura elipsoidal (m) y altura ortométrica (m s.n.m) según el modelo geoidal EGM06.	121
Tabla 3.3-A. Velocidades y rumbos de los desplazamientos de las balizas sobre el glaciar Mocho. Coordenadas expresadas en proyección UTM huso 18 sur, sistema geodésico WGS84. El azimut está referido al norte geográfico.	122
Tabla 3.4-A. Diferencia de altura de la superficie del glaciar Mocho medida en balizas para cada campaña (N°). Las celdas en amarillo representan cambio de altura sobre superficie de hielo. Las celdas en blanco representan cambios de altura en superficie de nieve. Valores negativos indican ablación y positivos acumulación. La fecha indica la fecha de la campaña correspondiente, y el periodo Δt es el intervalo entre la campaña anterior y la campaña actual.	125
Tabla 3.4-B. Balance de masa en balizas del glaciar Mocho (año 2013) para cada campaña (N°). Una acumulación (Acum.) negativa (en rojo) indica ablación, valores positivos corresponden a acumulación de nieve.	126
Tabla 3.4-C. Densidad de nieve (g/cm^3) en el glaciar Mocho. Los valores estimados están en negritas, los valores medidos sin negritas.	126
Tabla 3.4-D. Polinomios de tercer orden ajustados a los datos, donde y es la densidad de nieve en g/cm^3 y x es el mes observado.	127
Tabla 3.5.9-A. Principales núcleos habitados.	188
Tabla 3.5.11.1.1-A. Acumulación media por franja en año 2009-2010 y volumen total de agua en forma de nieve disponible para fundir.	201
Tabla 3.5.11.1.1-B. Volumen de equivalente en agua por cuenca en forma de nieve. ...	202
Tabla 3.5.11.2.2-A. Equivalente de agua por bandas de cota en la zona con glaciar. ...	209
Tabla 3.5.11.2.2-B. Equivalente de agua por bandas de cota y cuenca en la zona con glaciar.	209
Tabla 3.5.11.2.2-C. Equivalente de agua para escenario máximo.	212
Tabla 3.5.11.3.1-A. Volúmenes de agua que serían fundidos en un escenario eruptivo tipo 1 (erupción vulcaniana tipo 1864) para cada cuenca.	215
Tabla 3.5.11.3.1-B. Volúmenes de agua que serían fundidos en un escenario eruptivo tipo 2 (erupción vulcaniana tipo ca. 1550) para cada cuenca.	216
Tabla 3.5.11.3.1-C. Volúmenes de agua que serían fundidos en un escenario eruptivo tipo 3 (erupción vulcaniana-pliniana tipo Enco) para cada cuenca.	216
Tabla 3.5.11.3.1-D. Volúmenes de lahares estimados para cada cauce en un escenario eruptivo tipo 1 (erupción vulcaniana tipo 1864) para cada cuenca.	217
Tabla 3.5.11.3.1-E. Volúmenes de lahares estimados para cada cauce en un escenario eruptivo tipo 2 (erupción vulcaniana tipo ca. 1550) para cada cuenca.	218

Tabla 3.5.11.3.1-F. Volúmenes de lahares estimados para cada cauce en un escenario eruptivo tipo 3 (erupción vulcaniana-pliniana tipo Enco) para cada cuenca.	218
Tabla 3.4.11.3.2-A. Estimación volúmenes de agua que serían fundidos en un escenario eruptivo tipo 4 (erupción efusiva) para cada cuenca.	221
Tabla 3.5.11.3.2-B. Volúmenes de lahares estimados para cada cauce en un escenario eruptivo tipo 4 (erupción efusiva) para cada cuenca.	222
Tabla 4.2.1.1.3-A. Fecha de instalación y medición de las balizas en el glaciar Exploradores.	287
Tabla 4.2.1.2.1-A. Coordenadas estación base glaciar Exploradores.	288
Tabla.4.2.1.2.1-B. Coordenadas de las balizas sobre el glaciar Exploradores. al momento de su instalación. Coordenadas expresadas en proyección UTM huso 18 sur, sistema geodésico WGS84, altura elipsoidal (m) y altura ortométrica (m s.n.m) según el modelo geoidal EGM06.	289
Tabla.4.2.1.2.2-A. Coordenadas de las balizas sobre el glaciar Exploradores, al momento del segundo control. Coordenadas expresadas en proyección UTM huso 18 sur, sistema geodésico WGS84, altura elipsoidal (m) y altura ortométrica (m s.n.m) según el modelo geoidal EGM06.	291
Tabla 4.2.1.2.3-A. Ubicación de la balizas en el glaciar Exploradores. instaladas en el mes de octubre de 2013. Coordenadas expresadas en proyección UTM huso 18 sur. sistema geodésico WGS84, altura elipsoidal (m) y altura ortométrica (m s.n.m) según el modelo geoidal EGM06.	294
Tabla. 4.2.3-A. Coordenadas y velocidades de movimiento de las balizas sobre el glaciar Exploradores. Coordenadas expresadas en proyección UTM huso 18 sur. sistema geodésico WGS84. El azimut está referido al norte geográfico.	297
Tabla 4.2.5.1-A. Ablación medida en las balizas del glaciar Exploradores.	313
Tabla 4.2.5.2-A Flujos de energía promedio. periodo 1 al 27 noviembre 2013.	317
Tabla 4.3.1.1.1-A. Posición de balizas en el glaciar Tyndall. Coordenadas expresadas en proyección UTM huso 18 sur, sistema geodésico WGS84.	321
Tabla 4.3.1.1.3-A. Fecha de instalación y medición de las balizas en el glaciar Tyndall.	325
Tabla 4.3.1.2.1-A. Coordenadas estación base glaciar Tyndall (BTDL).	328
Tabla 4.3.1.2.1-B. Coordenadas de las balizas sobre el glaciar Tyndall. 8 abril 2013. Coordenadas expresadas en proyección UTM huso 18 sur, sistema geodésico WGS84, altura elipsoidal (m) y altura ortométrica (m s.n.m) según el modelo geoidal EGM06. .	328
Tabla 4.3.1.2.2-A. Coordenadas de las balizas sobre la transecta Japonesa en el glaciar Tyndall, al momento del segundo control el 10 de mayo de 2013. Coordenadas expresadas en proyección UTM huso 18 sur, sistema geodésico WGS84, altura elipsoidal (m) y altura ortométrica (m s.n.m) según el modelo geoidal EGM06.	329
Tabla 4.3.1.2.2-B. Coordenadas de las balizas sobre la transecta Raymond en el glaciar Tyndall. 10 de mayo de 2013. Coordenadas expresadas en proyección UTM huso 18 sur. sistema geodésico WGS84, altura elipsoidal (m) y altura ortométrica (m s.n.m) según el modelo geoidal EGM06.	329
Tabla 4.3.1.2.3-A. Ubicación de la balizas en el glaciar Tyndall. instaladas en octubre y noviembre de 2013. Coordenadas expresadas en proyección UTM huso 18 sur. sistema	

geodésico WGS84, altura elipsoidal (m) y altura ortométrica (m s.n.m) según el modelo geoidal EGM06.	331
Tabla 4.3.1.4.1-A. Coordenadas de los puntos de instalación de las cámaras automáticas. Coordenadas adquiridas con GPS tipo navegador. WGS84.	336
Tabla 4.3.1.4.1-B. Parámetros de ajuste de cámaras automáticas.	338
Tabla 4.3.2-A. Coordenadas y velocidades de movimiento de las balizas. transecta Japonesa. glaciar Tyndall. entre el 8 de abril y el 10 de mayo de 2013. Borde 2 representa el borde NE del glaciar. Coordenadas expresadas en proyección UTM huso 18 sur. sistema geodésico WGS84. El azimut se refiere al norte geográfico.	342
Tabla 4.3.2-B. Coordenadas y velocidades de movimiento de las balizas de la transecta Raymond. glaciar Tyndall. entre el 17 de noviembre de 2012 y el 10 de mayo de 2013. Coordenadas expresadas en proyección UTM huso 18 sur. sistema geodésico WGS84. El azimut se refiere al norte geográfico.	344
Tabla 4.3.4-A. Datos de las estaciones fluviométricas de la subcuenca glaciar Tyndall. Coordenadas expresadas en proyección UTM huso 18 S, sistema geodésico WGS84.	353
Tabla 4.3.5.1-A. Datos de ablación en las balizas de la transecta Japonesa, glaciar Tyndall.	359
Tabla 4.3.5.1-B. Datos de ablación en la transecta Raymond, glaciar Tyndall.	359
Tabla 4.2.5.2-A. Flujos de energía promedio.	364
Tabla 4.3.5.2-B. Ablación estimada con el balance de energía.	366
Tabla 7.2-A. Niveles de observación contemplados en el estudio jerárquico e integrado de glaciares de la Estrategia Nacional de Glaciares (DGA, 2009), según una propuesta del World Glacier Monitoring Service (WGMS, Haeberli et al., 2002).	388
Tabla 10.1-A. Coordenadas de las estaciones de muestreo.	428

1. RESUMEN EJECUTIVO

Se presentan en este Informe Final los resultados del estudio denominado **"Implementación Nivel 2 Estrategia Nacional de Glaciares: Mediciones glaciológicas terrestres en Chile Central, Zona Sur y Patagonia"** adjudicado por la Unidad de Glaciología y Nieves (UGN) de la Dirección General de Aguas (DGA) a Geoestudios Ltda., efectuado en el periodo marzo–noviembre 2013.

El proyecto consistió en la realización de mediciones glaciológicas terrestres en las zonas glaciológicas Centro (glaciares Bello y Yeso, Cajón del Yeso, cuenca del alto Maipo), Sur (glaciar sureste del volcán Mocho-Choshuenco) y Austral (glaciar Exploradores en el Campo de Hielo Patagónico Norte y glaciar Tyndall en el Campo de Hielo Patagónico Sur). En cada uno de estos 5 glaciares se realizaron 3 campañas de terreno, instalando una docena de balizas de ablación, mediciones de balizas en modo estático mediante posicionamiento satelital con receptores GNSS (Global Navigation Satellite System) de doble frecuencia, mediciones de la topografía superficial de transectas en el glaciar mediante receptores GNSS en modo cinemático, y mantención e instalación de estaciones meteorológicas automáticas (AWSs, Automatic Weather Stations) con implementación de un sistema de transmisión satelital vía red Iridium. Basado en la información de terreno se calculó un balance energético para los glaciares Yeso, Bello, Exploradores y Tyndall; un balance geodésico para los glaciares Yeso y Bello basado en datos de altimetría LIDAR de 2012; y un balance glaciológico para cada uno de los 5 glaciares basado en datos de balizas. En un cauce efluente del glaciar Mocho se instaló una estación automática de nivel de agua con la realización de dos aforos.

El proyecto incluye el estudio y el modelamiento del alcance de lahares en caso de erupción volcánica del volcán Mocho-Choshuenco, mediante los modelos Laharz y MSF, considerando escenarios explosivos y efusivos, basado en volúmenes de nieve hielo medidos y estimados. También se incluye el análisis de datos de caudales de 3 estaciones en el entorno del frente del glaciar Tyndall, y un análisis crítico de la red glaciológica de montaña de la DGA, con recomendaciones sobre monitoreos futuros, incluyendo glaciares blancos, cubiertos y de rocas.

Al final del proyecto (diciembre 2013) quedó instalada una red de balizas de ablación en

cada uno de los 5 glaciares, 4 AWS sobre la zona de ablación de cada uno de los glaciares Bello, Yeso, Exploradores y Tyndall con transmisión Iridium, 1 AWS en roca en el margen del glaciar Yeso sin transmisión satelital, la infraestructura necesaria para instalar sensores meteorológicos en un afloramiento de roca del glaciar Mocho, y 2 cámaras fotográficas secuenciales en el frente del glaciar Tyndall.

El proyecto se enmarca en la implementación del Nivel 2 de la Estrategia y Monitoreo de Glaciares: monitoreo de detalle, estudios con frecuencia bimensual a diez años plazo.

1.1. CONTRATO

El presente Informe reseña las actividades y resultados del estudio glaciológico contemplado en la Licitación Pública N°1019-1-LP13 denominada **“Implementación Nivel 2 Estrategia Nacional de Glaciares: Mediciones glaciológicas terrestres en Chile Central, Zona Sur y Patagonia”** adjudicada a **Geoestudios Ltda.**

Tal como lo indica el título del proyecto, el estudio incluye mediciones glaciológicas terrestres en las zonas glaciológicas Centro (glaciares Yeso y Bello en el Cajón del Yeso, Región Metropolitana), Sur (glaciar del volcán Mocho-Choshuenco, Región de los Ríos) y Austral (glaciar Exploradores, Región de Aysén y glaciar Tyndall, Región de Magallanes). Este Informe Final reporta las tres fases de campañas de terreno efectuadas a cada uno de los 5 glaciares indicados, el procesamiento y análisis de los datos, y las conclusiones. Las campañas de terreno incluyeron, entre otros, los trabajos de instalación de balizas de ablación, mediciones de posicionamiento satelital con GNSS (Global Navigation Satellite System, sistema de posicionamiento satelital que incluye actualmente el sistema GPS (Global Positioning System) y GLONASS (Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema), mantención e instalación de AWSs (Automatic Weather Stations) con instalación del sistema de transmisión satelital Iridium.

1.2. OBJETIVO GENERAL

El objetivo general del estudio, establecido en las Bases Técnicas de la licitación, es el de contribuir al desarrollo técnico-científico de la Dirección General de Aguas en el contexto de las actividades definidas en la Estrategia Nacional de Glaciares, particularmente aquellas que tienen relación con la implementación del Nivel 2 (**“Monitoreo de Detalle”**).

1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar un monitoreo de detalle, incluyendo balance de masa, energía y análisis de velocidad, en glaciares de las zonas glaciológicas Centro, Sur A y Austral A.
- Implementar el monitoreo para estimar las interacciones glacio-volcánicas para un glaciar ubicado en la zona glaciológica Sur A, entre las cuencas de los ríos Bío-Bío

- y Bueno (volcán Mocho-Choshuenco).
- Implementación de transmisión de datos meteorológicos vía teléfono satelital Iridium en dos estaciones meteorológicas portátiles instaladas en dos glaciares de la zona glaciológica Centro (Yeso y Bello), y dos glaciares de la zona glaciológica Austral A (Exploradores y Tyndall).

2. ZONA GLACIOLÓGICA CENTRO

2.1. INTRODUCCIÓN

La zona glaciológica centro corresponde a la cuenca alta del río Maipo en la Región Metropolitana. En esta cuenca se han seleccionado 2 glaciares (siguiendo los objetivos de las Bases Técnicas), el glaciar Bello (4,24 km²) y el glaciar Yeso (2,04 km²), ambos ubicados en el cajón del Bello, valle del Yeso, con cabeceras que alcanzan cotas cercanas a los 5000 m de altitud en los sectores somitales del Cerro Cuerno Blanco (5038 m) y Cerro Bello (5230 m), respectivamente, y frentes que bajan hasta los 4000 m (Glaciar Bello) y 3850 m (Glaciar Yeso).

Los frentes de estos glaciares se ubican a unos 9 km valle arriba, hacia el norte de los Baños El Plomo en la cabecera del Cajón del Yeso (ver Fig. 2.1-A). Existe un camino para vehículos hasta los Baños El Plomo y luego se debe proseguir a pie o en mulas/caballos. El acceso en helicóptero también es posible.

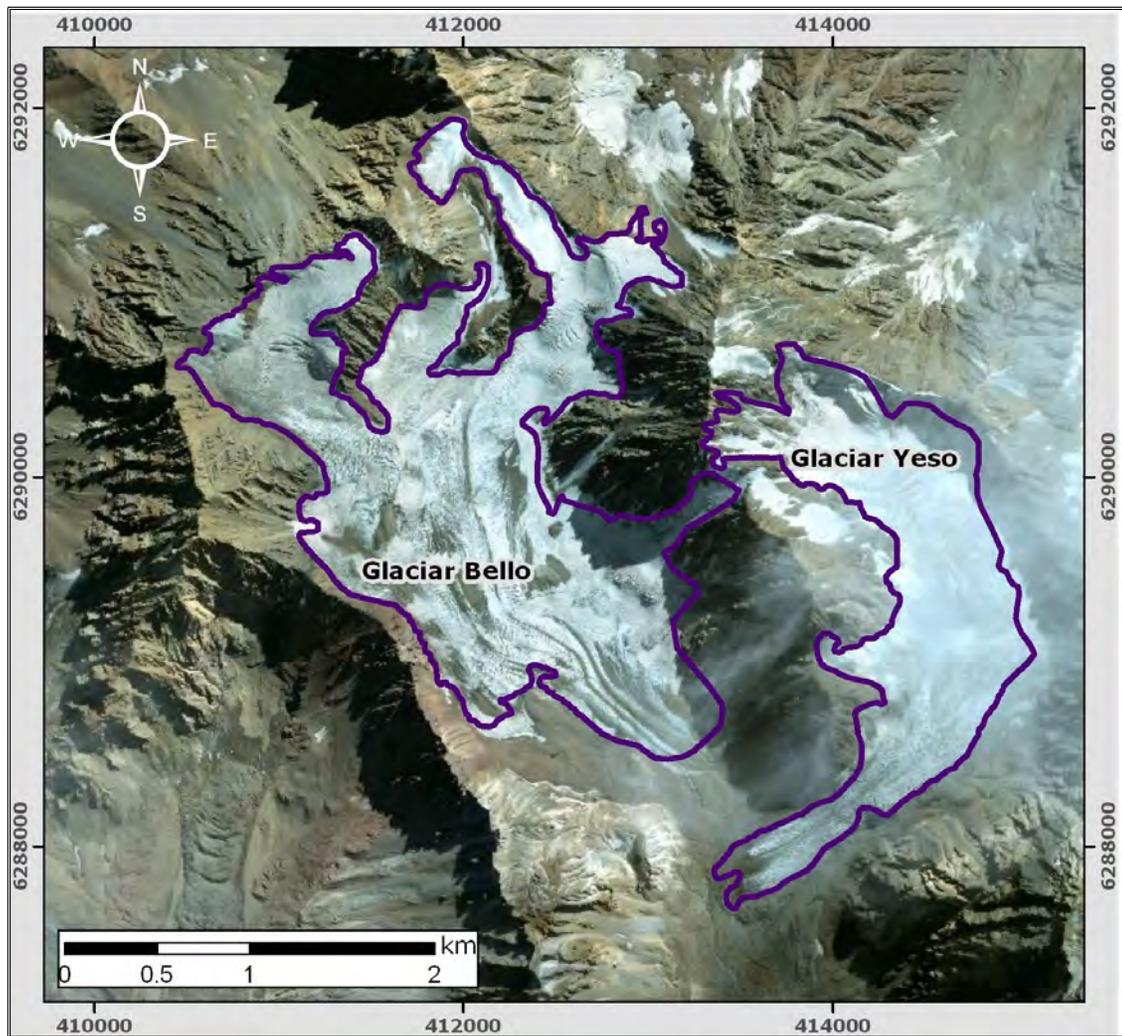


Fig. 2.1-A. Ubicación Glaciares Bello y Yeso. Fuente de la imagen: Word View 2, marzo 2010.

2.2. ACTIVIDADES DE TERRENO

Se realizaron tres campañas en las que se efectuaron todas las actividades solicitadas en las bases técnicas. La primera en cuanto se comenzó el contrato (marzo 2013), la segunda antes del invierno (mayo 2013), y la tercera en primavera (noviembre 2013).

Para cada una de las campañas se estableció un campamento base en un punto cercano al frente de los glaciares Yeso y Bello, desde donde se efectuaron los trabajos en ambos

glaciares. Las tres campañas requirieron de entre 8 y 10 días de trabajo con un equipo de cuatro personas que trabajaron, por lo general, con dos grupos en paralelo.

El acceso al lugar de campamento se efectuó a pie desde las Termas del Plomo en las tres ocasiones. El equipo de campamento y los materiales de trabajo se transportaron íntegramente con mulas en la primera campaña, en la segunda campaña mediante una combinación de mulas y apoyo de helicóptero para retirar las estaciones meteorológicas, y la tercera a pie con apoyo de porteadores y de un helicóptero para la instalación de las estaciones meteorológicas.

En la primera campaña de marzo se instalaron dos estaciones meteorológicas, una en el Bello y otra en el margen del Yeso, con balizas en ambos glaciares que se controlaron con DGPS y trayectorias con DGPS cinemático sobre el glaciar.

La segunda campaña se realizó en mayo, en esa ocasión se retiraron las estaciones meteorológicas y se controlaron nuevamente con DGPS las balizas instaladas.

La tercera campaña se realizó a principios de noviembre, en esta ocasión se instalaron balizas que se controlaron con DGPS y quedaron insertas en hielo hasta una profundidad de 5 m aproximadamente para asegurar su subsistencia durante la temporada de verano. Se instalaron tres estaciones meteorológicas automáticas, dos sobre el hielo, una en cada glaciar, ambas equipadas con transmisor satelital y marco de ablación. La tercera se instaló en el margen del glaciar Yeso, sobre roca, en la misma ubicación donde estuvo instalada en marzo-mayo 2013.

2.2.1. Estaciones meteorológicas

2.2.1.1. Campaña N°1 (marzo 2013)

Se detalla a continuación la instalación de las estaciones meteorológicas tipo Geus y Trípode. La primera sobre el hielo en la zona de ablación del glaciar Bello, y la segunda en el margen occidental de la zona baja del plateau central del glaciar Yeso.

Las instrucciones necesarias para la instalación fueron facilitadas directamente por personal de la DGA al personal de Geoestudios durante el día de la entrega de las

estaciones en dependencias de la DGA en Santiago de Chile.

El día 27 de marzo se llevó a cabo la instalación de la estación meteorológica GEUS en la zona de ablación el glaciar Bello, en la cota 4160 m s.n.m. Los detalles del emplazamiento de las estaciones están expresados en la Tabla 2.2.1.1-A.

Tabla 2.2.1.1-A. Datos de instalación de las AWS en los glaciares Bello y Yeso. Coordenadas obtenidas con GPS navegador.

Instalación			Posición UTM		
Fecha	Glaciar	AWS	Este (m)	Norte (m)	Cota (m)
28-03-2013	Yeso	Trípode	414.304	6.288.762	4300
27-03-2013	Bello	GEUS	412.748	6.289.123	4160

Los sensores y el panel solar fueron dispuestos según el diseño establecido. La altura de la barra de sensores quedó fijada en 2,05 m. La orientación y ángulo de la placa solar fue cuidadosamente regulada. La dirección de la veleta del anemómetro está registrada con brújula y mediante fotos del día de la instalación. Al término de la instalación se chequeó el funcionamiento y los parámetros de los sensores mediante la conexión al data logger desde un PC con el software correspondiente. Detalles de la instalación se ilustran en la Fig. 2.2.1.1-A.



Fig. 2.2.1.1-A. Estación meteorológica GEUS, con su configuración y emplazamiento definitivo, glaciar Bello.

El día 28 de marzo se instaló la estación Trípode en el margen occidental del glaciar Yeso sobre un sector de morrenas laterales ubicadas sobre el sector de séracs en la cota 4300 m s.n.m. (Figs. 2.2.1.1-B y C).



Fig. 2.2.1.1-B. Emplazamiento de la estación meteorológica Trípode instalada en el margen occidental del glaciar Yeso.

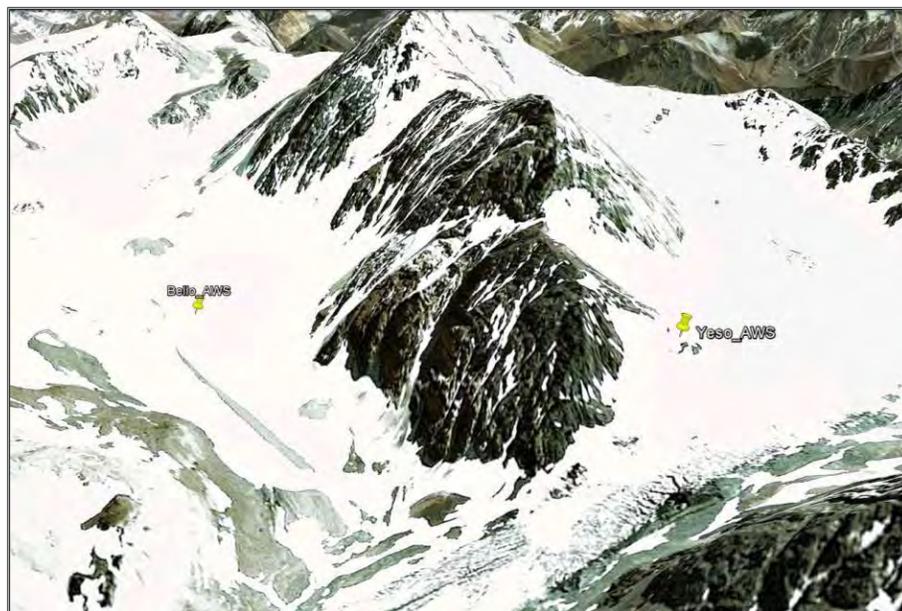


Fig. 2.2.1.1-C. En la imagen Google Earth se observa el emplazamiento de las estaciones meteorológicas automáticas en los glaciares Bello (izquierda) y Yeso (derecha).

2.2.1.2. ***Campaña N°2***

Las estaciones meteorológicas GEUS y Trípode instaladas en los glaciares Bello y Yeso durante la Campaña N°1 se mantuvieron en operación desde la fecha de instalación hasta que fueron retiradas el día 29 de abril de 2013. La información de las estaciones fue descargada. Los datos están descritos en 2.4. Meteorología y adjuntos en el Anexo 10.2 Anexos Digitales 04_Meteorología.

2.2.1.3. ***Campaña N°3***

Se instalaron 2 estaciones meteorológicas GEUS con sistema de transmisión satelital Iridium, una en el glaciar Bello y otra en el glaciar Yeso (posición de las estaciones en Tabla 2.2.1.3-A). Acopladas a éstas se instalaron marcos de ablación equipados con sensor de altura de nieve conectado al data logger de la estación. Los marcos de ablación fueron instalados con una estructura conformada por dos postes de aluminio de 6 m de largo, enterrados 5,5 m en el glaciar, unidos por un travesaño de tubo de aluminio de 3 m de largo, sujeto a los postes, y en posición horizontal (AWS GEUS Bello en

Fig. 2.2.1.3-A, y AWS Yeso en Fig. 2.2.1.3-B).

Al igual que en la primera campaña, se instaló una estación trípode Vaisala en el margen del glaciar Yeso, en la misma ubicación que fue instalada en marzo, sobre roca, con una batería externa de 18 amperes. Se reforzó su anclaje por medio de vientos de alambre (Fig. 2.2.1.3-C)

Tabla 2.2.1.3-A. Datos de instalación de las AWS en los glaciares Bello y Yeso. Coordenadas obtenidas con GPS navegador.

Instalación			Posición UTM		
Fecha	Glaciar	AWS	Este (m)	Norte (m)	Cota (m)
15-11-2013	Yeso	Trípode	414.304	6.288.762	4300
15-11-2013	Yeso	GEUS	414.554	6.289.714	4428
15-11-2013	Bello	GEUS	412.744	6.289.113	4134



Fig. 2.2.1.3-A. En la imagen se observa la estación GEUS en el glaciar Bello con el marco de ablación correspondiente.



Fig. 2.2.1.3-B. En la imagen se observa la estación GEUS en el glaciar Yeso con el marco de ablación correspondiente.



Fig. 2.2.1.3-C. Estación Vaisala ubicada en el margen del glaciar Yeso.

2.2.2. Red de balizas de ablación

2.2.2.1. Campaña N°1

Las posiciones para cada una de las balizas fueron elegidas de acuerdo a la posición planificada y a las condiciones del terreno. En el glaciar Bello algunas de las balizas debieron situarse en sectores diferentes a lo programado debido a razones de tiempo y terreno. Para la instalación de balizas se utilizó un taladro manual para perforaciones en hielo modelo Ice Auger de la fábrica Kovacs (Fig. 2.2.2.1-A).

Para instalar cada baliza se perforó 1,9 m en promedio de manera de dejar 0,6 m de coligüe a la vista (fuera del hielo) para que en caso de acumulaciones de nieve debido a posibles tormentas de otoño, las balizas no quedaran cubiertas bajo el manto, y por otro lado, 1,9 m de baliza bajo la superficie del hielo aseguraría la mantención en su sitio original aun en caso de ablaciones extremas durante el periodo planificado de 30 días entre la fecha de instalación y la fecha de control.

Las balizas utilizadas correspondieron a coligües de aproximadamente 2,5 m de largo y 1" de diámetro promedio. El largo de cada coligüe fue medido antes de su instalación, y su altura sobre la superficie fue medida una vez situado en la perforación, cuyos datos se presentan en las Tablas 2.2.2.1-A y B.



Fig. 2.2.2.1-A. Perforación manual en el hielo para instalación de baliza en el glaciar Bello con el taladro Ice Auger de Kovacs.

Tabla 2.2.2.1-A. Control de ablación en el glaciar Bello.

Instalación				
Glaciar	Baliza	Fecha	Largo baliza (cm)	Baliza fuera del hielo (cm)
Bello	L1	30-03-2013	232,0	65,0
Bello	L2	27-03-2013	241,0	74,5
Bello	L3	27-03-2013	237,5	65,5
Bello	T1	30-03-2013	232,0	85,5
Bello	T2	27-03-2013	233,0	64,5
Bello	T3	27-03-2013	230,0	53,5
Bello	T4	30-03-2013	236,0	82,0
Bello	T5	27-03-2013	237,2	73,9
Bello	T6	27-03-2013	230,3	61,0
Bello	T7	30-03-2013	227,0	111,0
Bello	T8	29-03-2013	240,5	66,5
Bello	T9	30-03-2013	240,0	58,0

Tabla 2.2.2.1-B. Control de ablación en el glaciar Yeso.

Instalación				
Glaciar	Baliza	Fecha	Largo baliza (cm)	Baliza fuera del hielo (cm)
Yeso	L1	29-03-2013	242,0	59,0
Yeso	L2	28-03-2013	239,0	59,0
Yeso	L3	29-03-2013	233,0	62,5
Yeso	T1	29-03-2013	241,0	75,5
Yeso	T2	29-03-2013	239,0	52,2
Yeso	T3	29-03-2013	235,0	65,0
Yeso	T4	28-03-2013	240,0	64,5
Yeso	T5	28-03-2013	239,0	67,0
Yeso	T6	28-03-2013	235,0	63,0
Yeso	T7	29-03-2013	240,0	61,0
Yeso	T8	29-03-2013	235,0	97,5
Yeso	T9	29-03-2013	239,0	83,0

2.2.2.2. **Campaña N°2**

La medición de las balizas de ablación se efectuó entre el día 28 y 30 de Abril. Los resultados están reflejados en 2.5.1. Balance Glaciológico.

2.2.2.3. **Campaña N°3**

Se instaló la red de balizas en las transectas y longitudinales en los glaciares Bello y Yeso. Las perforaciones se realizaron con taladro a vapor hasta una profundidad entre 5 m en hielo. La profundidad de perforación, la longitud de las balizas instaladas y otros datos importantes están reflejados en las Tablas 2.2.2.3-A y B. En las perforaciones se dejaron instaladas balizas de PVC de color naranja de 4 secciones de 1,5 m cada sección, con 6 m de longitud total.

Tabla 2.2.2.3-A. Fecha de instalación y medición de las balizas en el glaciar Bello.

Glaciar	Baliza	Fecha	Largo baliza (cm)	Altura fuera del hielo (cm)
Bello	L1	13-11-2013	500	100
Bello	L2	13-11-2013	500	100
Bello	L3	13-11-2013	500	100
Bello	T1	13-11-2013	500	100
Bello	T2	13-11-2013	500	100
Bello	T3	13-11-2013	500	100
Bello	T4	13-11-2013	500	100
Bello	T5	13-11-2013	500	100
Bello	T6	13-11-2013	500	100
Bello	T7	13-11-2013	500	100
Bello	T8	13-11-2013	500	100
Bello	T9	13-11-2013	500	100

Tabla 2.2.2.3-B. Fecha de instalación y medición de las balizas en el glaciar Yeso.

Glaciar	Baliza	Fecha	Largo baliza (cm)	Baliza fuera del hielo (cm)
Yeso	L1	14-11-2013	600	100
Yeso	L2	14-11-2013	600	100
Yeso	L3	14-11-2013	600	100
Yeso	T1	14-11-2013	600	100
Yeso	T2	14-11-2013	600	100
Yeso	T3	14-11-2013	600	100
Yeso	T4	14-11-2013	600	100
Yeso	T5	14-11-2013	600	100
Yeso	T6	14-11-2013	600	100
Yeso	T7	15-11-2013	600	100
Yeso	T8	15-11-2013	600	100
Yeso	T9	15-11-2013	600	100

2.2.3. Mediciones DGPS

El método GPS diferencial se basa en la captura de datos satelitales simultáneamente en una estación base GPS y en una estación móvil, y su posterior procesamiento, donde se logra disminuir los errores del cómputo de las posiciones basado en el hecho que la estación base instalada en roca está fija a las escalas de tiempo de nuestras mediciones (pocos días). Las precisiones horizontales alcanzadas para las posiciones móviles son del orden de 5 cm mientras que las precisiones verticales son del orden de 10 cm.

2.2.3.1. Campaña N°1

2.2.3.1.1 Instalación equipo GNSS

Entre los días 28 y 30 de marzo de 2013 se realizó la primera campaña de terreno en los glaciares Bello y Yeso, en la cual se realizaron mediciones DGPS en modo estático y cinemático. Para la instalación de la antena del receptor GNSS doble frecuencia Trimble R6 se eligió una roca sólida ubicada junto al campamento base Bello-Yeso en la cual se realizó una perforación con taladro percutor y broca de 5/8". En la perforación se instaló un tornillo de expansión de 5/8". Una vez instalado el perno se instaló la antena sobre éste, se conectó la batería para energizar el instrumento y finalmente inicializar el receptor GNSS desde el controlador (ver Fig. 2.2.3.1.1-A).



Fig. 2.2.3.1.1-A. Receptor GNSS Trimble R6 y batería de alimentación instalado sobre roca sólida junto al campamento base.

2.2.3.1.2 Control de posición de balizas con equipo GNSS

Para el control de posición de las balizas con equipo GNSS se utilizó un trípode topográfico y base nivelante para situar la antena de manera precisa y estable sobre la baliza (Fig. 2.2.3.1.2-A). Para lograr esto se debe contar con la baliza ya instalada en el hielo, para luego instalar el trípode topográfico con la base nivelante centrada sobre la baliza. Una vez instalado y asegurado el trípode y la base nivelante, se acopla la antena receptora GNSS y se mide la distancia entre el tope de la baliza y el centro del tope protector del receptor. Una vez completados los pasos anteriores se realiza la grabación de posición en forma estática desde el controlador del receptor GNSS durante el tiempo necesario, que era del orden de 10 a 15 minutos en nuestro caso.

Los datos obtenidos se indican en las Tablas 2.2.3.1.2-A y B. La ubicación general de las balizas sobre los glaciares Bello y Yeso se pueden apreciar en las Figs. 2.2.3.1.2-B y C respectivamente. Las ubicaciones de las balizas y los levantamientos cinemáticos realizados en ambos glaciares se indican en la Fig. 2.2.3.1.2-D.

En el sector inferior del glaciar Bello se aprecia una falta de datos cinemáticos que fue provocado por una combinación de falta de tiempo y condiciones de grietas sobre la superficie. Durante la tercera campaña (en primavera) se completó este levantamiento cinemático.



Fig. 2.2.3.1.2-A. Personal de Geoestudios en el glaciar Bello durante la grabación de datos desde el controlador del receptor GNSS. Se observa el receptor GNSS instalado sobre el trípode y base nivelante.

Tabla 2.2.3.1.2-A. Posición de las balizas en el glaciar Bello. Las coordenadas son similares a aquellas establecidas en el plan original. Coordenadas expresadas en proyección UTM huso 19 sur, sistema geodésico WGS84, altura elipsoidal (m) y altura ortométrica (m s.n.m.) según el modelo geoidal EGM06.

Glaciar	Baliza	Fecha instalación	UTM E (m)	UTM N (m)	Altura elipsoidal (m)	Altura ortométrica (m s.n.m.)
Bello	L1	30-03-2013	411.669,09	6.290.395,92	4434,74	4465,21
Bello	L2	27-03-2013	412.290,58	6.289.299,34	4270,13	4300,58
Bello	L3	27-03-2013	413.002,48	6.288.848,37	4078,13	4108,56
Bello	T1	30-03-2013	411.665,72	6.290.074,11	4383,60	4414,07
Bello	T2	27-03-2013	411.722,29	6.290.355,37	4412,59	4443,06
Bello	T3	27-03-2013	412.354,68	6.290.519,08	4478,55	4509,01
Bello	T4	30-03-2013	411.751,28	6.289.799,75	4340,44	4370,90
Bello	T5	27-03-2013	411.763,17	6.290.122,09	4380,15	4410,61
Bello	T6	27-03-2013	412.316,99	6.290.140,89	4396,56	4427,02
Bello	T7	30-03-2013	412.423,42	6.289.129,90	4178,63	4209,08
Bello	T8	29-03-2013	412.595,48	6.289.249,09	4182,04	4212,48
Bello	T9	30-03-2013	412.865,63	6.289.228,91	4164,21	4194,65

Tabla 2.2.3.1.2-B. Posición de las balizas en el glaciar Yeso. Las coordenadas son similares a aquellas establecidas en el plan original. Coordenadas expresadas en proyección UTM huso 19 sur, sistema geodésico WGS84, altura elipsoidal (m) y altura ortométrica (m s.n.m) según el modelo geoidal EGM06.

Glaciar	Baliza	Fecha instalación	UTM (E)	UTM N (m)	Altura elipsoidal (m)	Altura ortométrica (m s.n.m.)
Yeso	L1	29-03-2013	414.647,45	6.289.652,63	4453,53	4483,92
Yeso	L2	28-03-2013	414.486,12	6.288.834,44	4291,81	4422,20
Yeso	L3	29-03-2013	413.849,56	6.288.036,54	3970,85	4001,25
Yeso	T1	29-03-2013	414.556,37	6.289.617,02	4451,07	4481,46
Yeso	T2	29-03-2013	414.702,01	6.289.566,44	4431,51	4661,90
Yeso	T3	29-03-2013	414.916,39	6.289.516,86	4401,66	4432,04
Yeso	T4	28-03-2013	414.401,64	6.289.035,14	4307,74	4338,13
Yeso	T5	28-03-2013	414.670,87	6.289.083,91	4298,09	4328,47
Yeso	T6	28-03-2013	414.894,93	6.289.160,32	4326,01	4356,39
Yeso	T7	29-03-2013	413.919,37	6.288.161,45	4009,35	4039,75
Yeso	T8	29-03-2013	413.941,28	6.288.104,61	4005,89	4036,29
Yeso	T9	29-03-2013	413.971,64	6.288.042,93	3999,27	4029,67

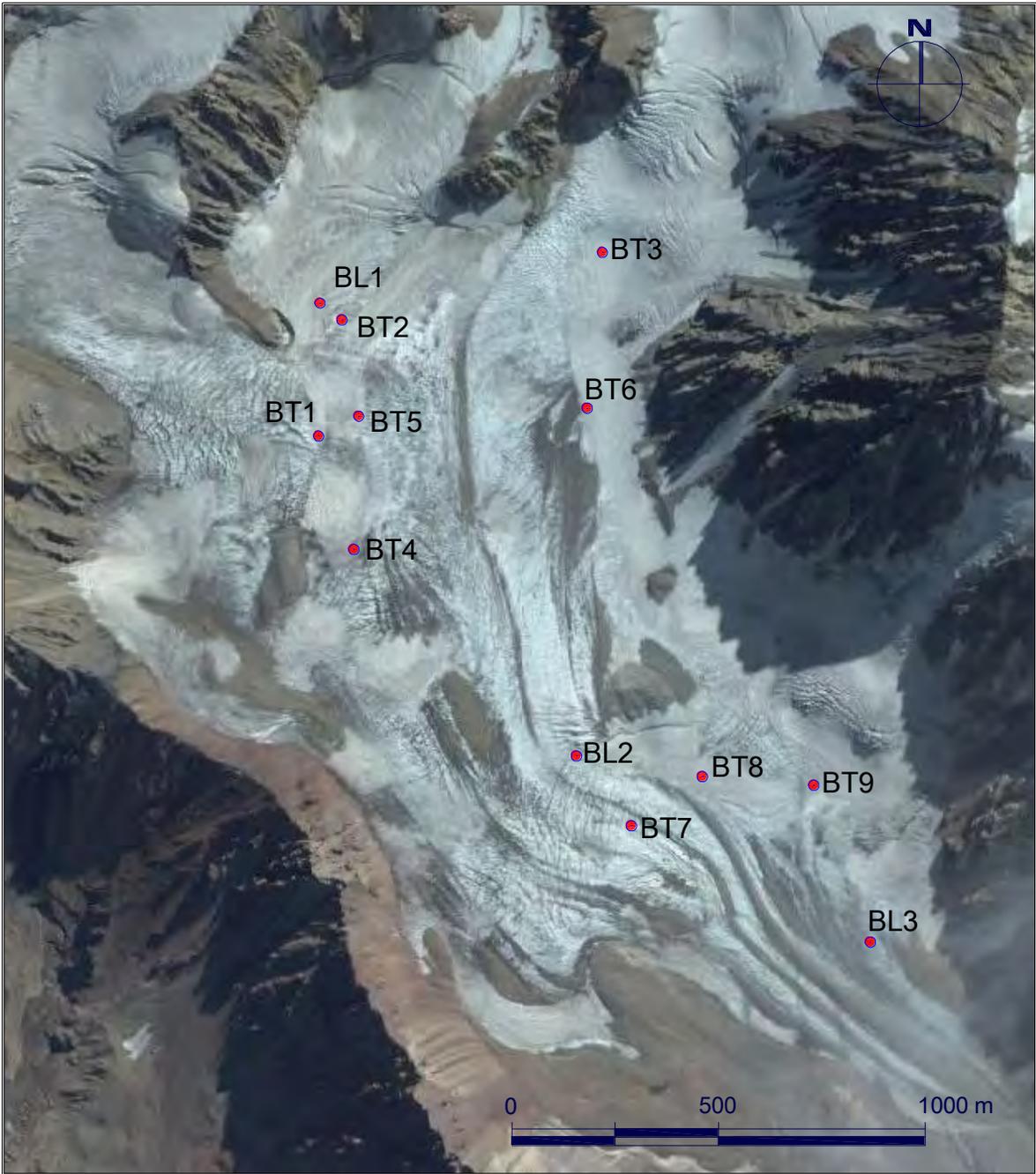


Fig. 2.2.3.1.2-B. Ubicación de las balizas en el glaciar Bello.



Fig. 2.2.3.1.2-C. Ubicación de las balizas en el glaciar Yeso.



Fig. 2.2.3.1.2-D. Ubicación de balizas y levantamientos GNSS cinemáticos (línea roja) en los glaciares Bello y Yeso.

2.2.3.2. ***Campaña N°2***

Entre los días 28 y 30 de abril de 2013 se realizó la segunda campaña de terreno a los glaciares Bello y Yeso, en la cual se realizaron mediciones DGPS en modo estático. Las coordenadas obtenidas en cada una de las balizas controladas se muestran en las Tablas 2.2.3.2-A y B.

Tabla 2.2.3.2-A. Coordenadas de las balizas en el glaciar Bello al momento del segundo control. Coordenadas expresadas en proyección UTM huso 19 sur, sistema geodésico WGS84, altura elipsoidal (m) y altura ortométrica (m s.n.m) según el modelo geoidal EGM06.

Baliza	FECHA	UTM E (m)	UTM N (m)	Altura elipsoidal (m)	Altura ortométrica (m s.n.m.)
BL1	29-04-2013	411.669,59	6.290.394,98	4434,31	4464,78
BL2	29-04-2013	412.291,08	6.289.298,73	4269,33	4299,77
BL3	29-04-2013	413.002,67	6.288.847,89	4077,76	4108,19
BT1	29-04-2013	411.666,25	6.290.073,28	4382,77	4413,24
BT2	29-04-2013	411.722,78	6.290.354,47	4412,29	4442,76
BT3	29-04-2013	412.353,67	6.290.517,81	4477,84	4508,30
BT4	29-04-2013	411.751,45	6.289.798,88	4339,87	4370,33
BT5	29-04-2013	411.763,37	6.290.121,21	4380,02	4410,48
BT6	29-04-2013	412.316,82	6.290.140,43	4396,34	4426,80
BT7	29-04-2013	412.424,11	6.289.129,63	4177,78	4208,23
BT8	29-04-2013	412.595,68	6.289.248,82	4181,40	4211,84
BT9	29-04-2013	412.865,67	6.289.228,23	4163,66	4194,09

Tabla 2.2.3.2-B. Coordenadas de balizas en el glaciar Yeso al momento del segundo control. Coordenadas expresadas en proyección UTM huso 19 sur, sistema geodésico WGS84, altura elipsoidal (m) y altura ortométrica (m s.n.m) según el modelo geoidal EGM06.

Baliza	FECHA	UTM E (m)	UTM N (m)	Altura elipsoidal (m)	Altura ortométrica (m s.n.m.)
YL1	29-04-2013	414.648,31	6.289.650,52	4453,28	4483,67
YL2	29-04-2013	414.485,95	6.288.833,05	4291,75	4322,14
YL3	29-04-2013	413.847,96	6.288.035,29	3970,28	4000,68
YT1	29-04-2013	414.557,03	6.289.615,03	4450,57	4480,96
YT2	29-04-2013	414.702,89	6.289.564,49	4430,75	4461,14
YT3	29-04-2013	414.916,56	6.289.515,55	4401,44	4431,83
YT4	29-04-2013	414.401,75	6.289.034,77	4307,48	4337,88
YT5	29-04-2013	414.670,73	6.289.082,11	4297,97	4328,36
YT6	29-04-2013	414.894,49	6.289.158,30	4325,16	4355,54
YT7	29-04-2013	413.917,22	6.288.160,13	4008,73	4039,12
YT8	29-04-2013	413.939,26	6.288.103,05	4005,21	4035,61
YT9	29-04-2013	413.969,87	6.288.041,45	3998,27	4028,66

2.2.3.3. **Campaña N°3**

Entre el día 8 al 15 y 21 al 23 de noviembre de 2013 se realizó la tercera campaña de terreno a los glaciares Bello y Yeso, incluyendo mediciones DGPS en modo estático y cinemático. Se realizaron mediciones DGPS en modo estático en 12 balizas sobre el glaciar Bello y 11 balizas en el glaciar Yeso. El receptor móvil fue instalado directamente sobre la baliza de PVC como muestra la Fig. 2.2.3.3-A. La distribución de las balizas sobre los glaciares se aprecia en las Figs. 2.2.3.3-B y C. También se completó el levantamiento cinemático iniciado en la primera campaña en el glaciar Bello. Las posiciones de las balizas instaladas se indican en las Tablas 2.2.3.3-A y B.



Fig. 2.2.3.3-A. En la imagen se observa el receptor GPS móvil ubicado en la baliza T7 del glaciar Yeso.

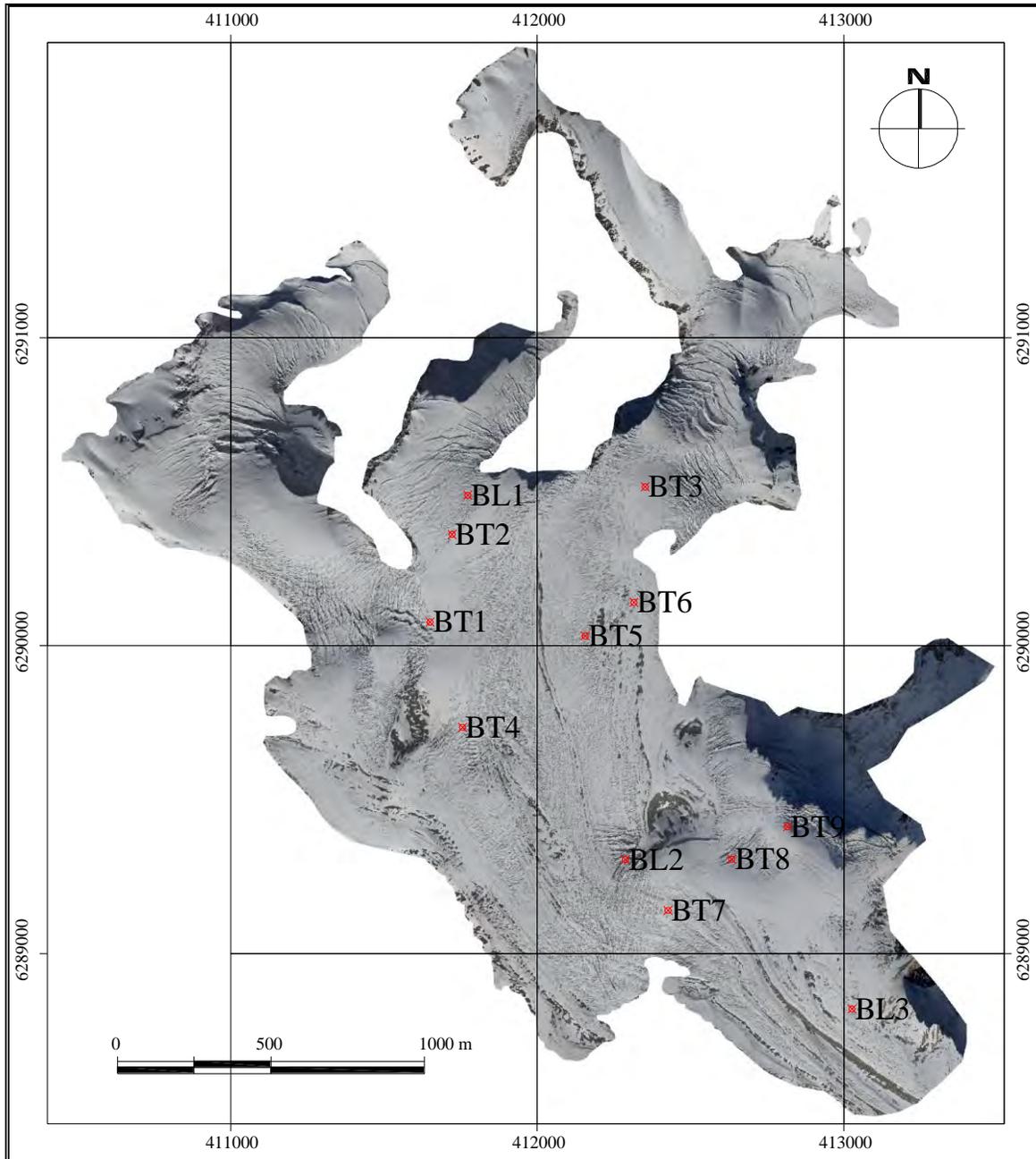


Fig. 2.2.3.3-B. Ubicación de las balizas instaladas el mes de noviembre de 2013 en el glaciar Bello. La imagen corresponde a una ortofoto LIDAR de Digimapas del 22-24 de abril de 2012.

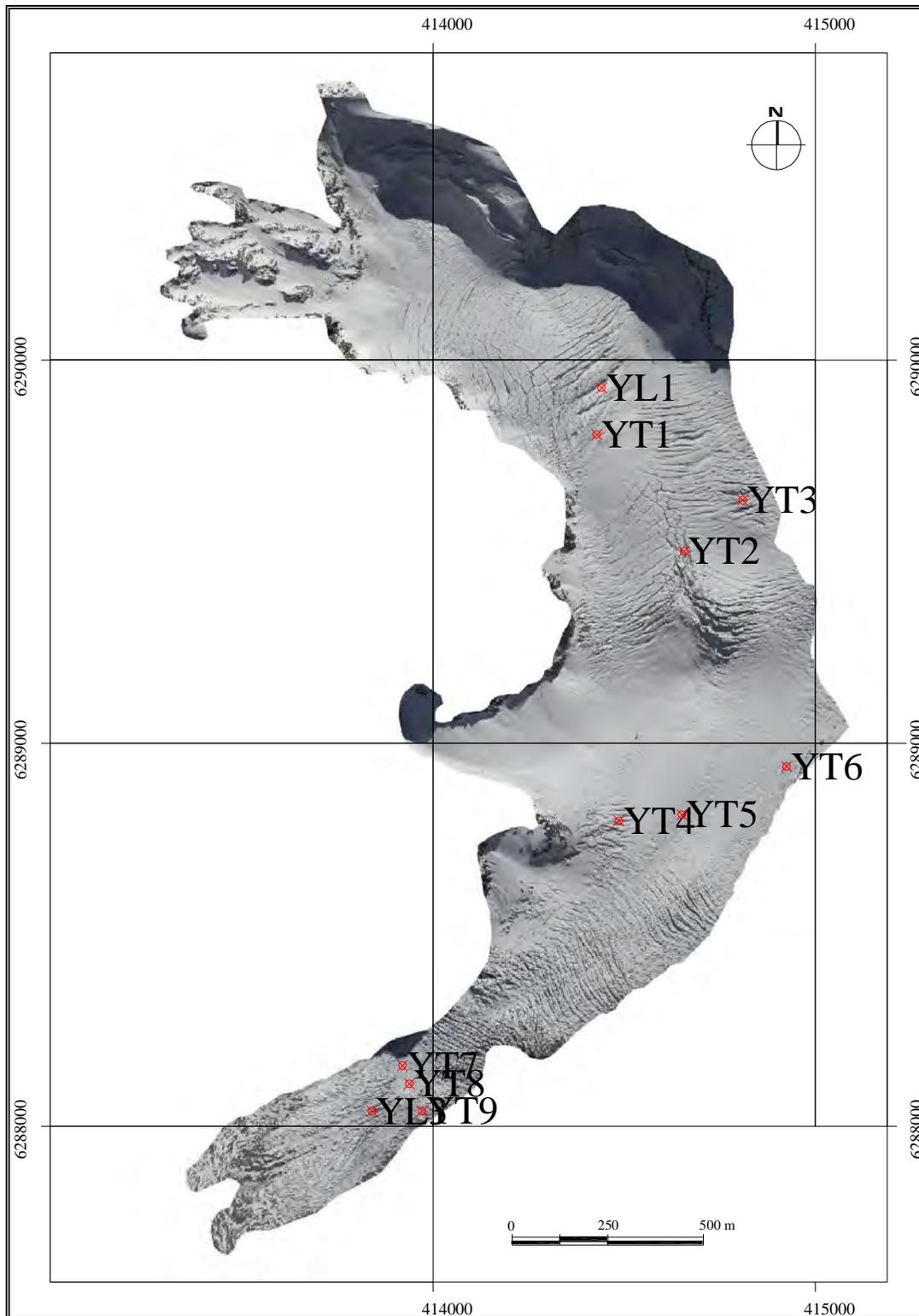


Fig. 2.2.3.3-C. Ubicación de las balizas instaladas el mes de noviembre de 2013 en el glaciar Yeso. La imagen corresponde a una ortofoto LIDAR de Digimapas del 22-24 de abril de 2012.

Tabla 2.2.3.3-A. Ubicación de la balizas en el glaciar Bello en el mes de noviembre de 2013. Coordenadas expresadas en proyección UTM huso 19 sur, sistema geodésico WGS84, altura elipsoidal (m) y altura ortométrica (m s.n.m) según el modelo geoidal EGM06.

Baliza	UTM E (m)	UTM N (m)	Altura elipsoidal (m)	Altura ortométrica (m s.n.m.)
L1	411.773,03	6.290.488,68	4444,01	4474,48
L2	412.286,93	6.289.305,49	4273,19	4303,63
L3	413.026,63	6.288.820,02	4072,56	4102,98
T1	411.650,09	6.290.076,94	4390,06	4420,52
T2	411.722,20	6.290.361,87	4415,12	4445,59
T3	412.351,66	6.290.515,94	4479,25	4509,66
T4	411.755,91	6.289.735,05	4340,72	4371,19
T5	412.156,40	6.290.031,76	4368,48	4398,94
T6	412.315,16	6.290.140,56	4396,29	4426,74
T7	412.426,63	6.289.140,38	4178,84	4209,29
T8	412.634,41	6.289.306,67	4209,16	4239,60
T9	412.815,78	6.289.412,55	4230,95	4261,39

Tabla 2.2.3.3-B. Ubicación de la balizas en el glaciar Yeso en el mes de noviembre de 2013. Coordenadas expresadas en proyección UTM huso 19 sur, sistema geodésico WGS84, altura elipsoidal (m) y altura ortométrica (m s.n.m) según el modelo geoidal EGM06.

Baliza	UTM E (m)	UTM N (m)	Altura elipsoidal (m)	Altura ortométrica (m s.n.m.)
L1	414.441,45	6.289.927,24	4505,32	4535,71
L3	413.841,19	6.288.039,32	3971,01	4001,40
T1	414.428,82	6.289.805,57	4493,79	4524,18
T2	414.657,50	6.289.500,38	4430,84	4461,23
T3	414.810,93	6.289.633,60	4436,55	4466,94
T4	414.487,03	6.288.797,25	4289,58	4319,97
T5	414.651,77	6.288.813,46	4278,57	4308,96
T6	414.925,41	6.288.938,99	4300,38	4330,77
T7	413.920,74	6.288.158,83	4011,89	4042,28
T8	413.938,71	6.288.111,28	4009,19	4039,58
T9	413.972,12	6.288.039,77	4000,40	4030,79

Para completar el levantamiento cinemático realizado en marzo en el glaciar Bello se realizó un nuevo levantamiento en sectores que habían quedado sin cobertura en esa fecha. Las trayectorias levantadas se muestran en la Fig. 2.2.3.3-D.

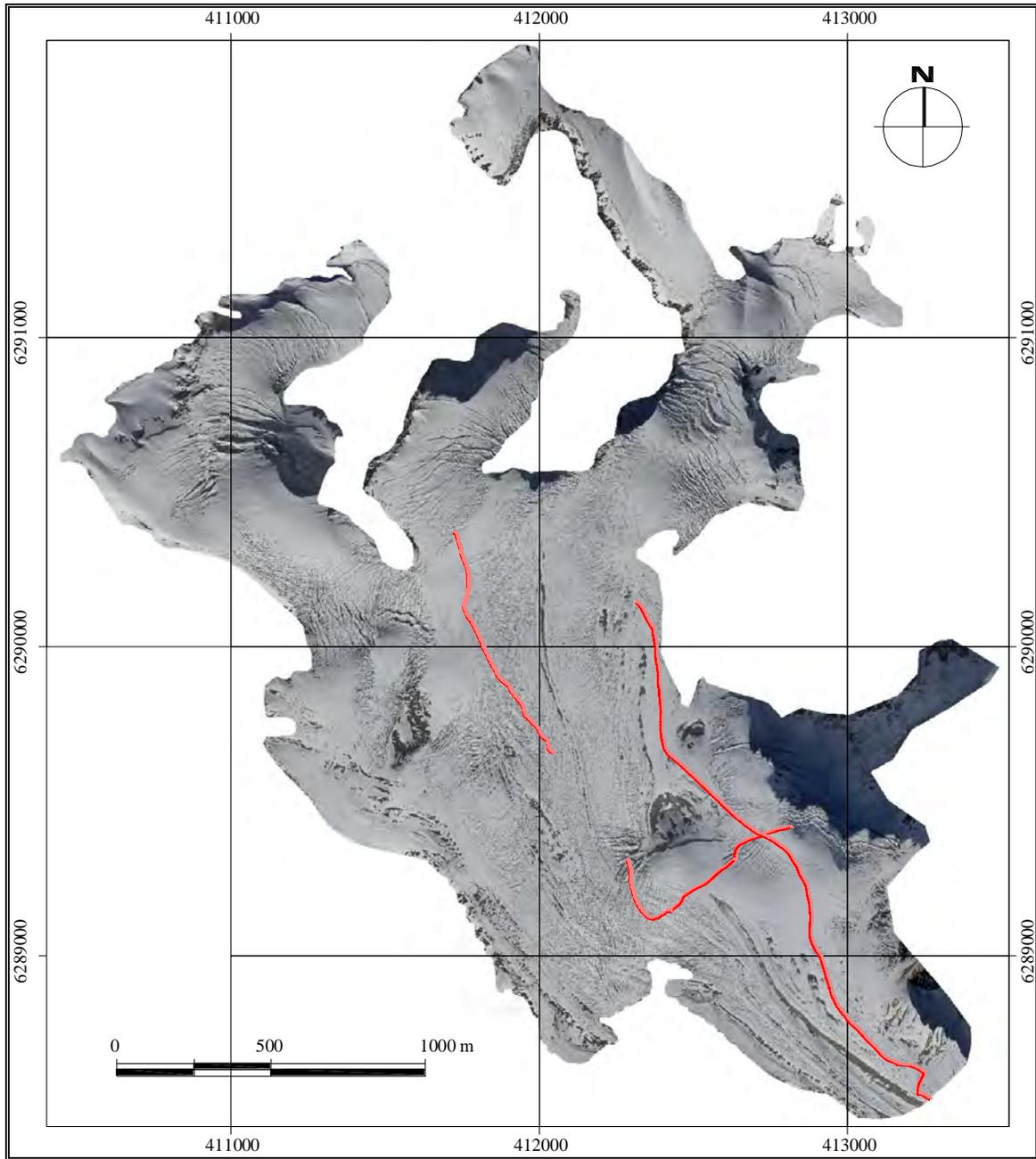


Fig. 2.2.3.3-D. Levantamiento cinemático realizado el mes de noviembre de 2013 en el glaciar Bello. La imagen corresponde a una ortofoto LIDAR de Digimapas del 22-24 de abril de 2012.

2.3. VELOCIDAD DE MOVIMIENTO

Para determinar la velocidad superficial de los glaciares se instaló una red balizas en puntos representativos controlando su posición en dos oportunidades distintas, con lo cual se determina para dicho periodo de tiempo una velocidad y dirección del desplazamiento del glaciar. El método de medición utilizado para determinar la posición de las balizas es el GNSS (Global Navigation Satellite System, que incluye el sistema GPS) diferencial estático, el cual se basa en las mediciones simultáneas de dos o más receptores GNSS, uno ubicado en un punto fijo (normalmente en roca), y otro en una baliza en el glaciar, que reciben señales del mismo conjunto de satélites al mismo tiempo, por lo cual están afectos a errores similares, los cuales se pueden cancelar al conocer las coordenadas de la estación de referencia que permanece fija, al contrario de la posición del glaciar que varía dependiendo de su flujo.

Las estaciones fijas o de referencia fueron materializadas con pernos de expansión de 5/8" taladrados sobre afloramientos de roca firme, donde se monta un receptor GNSS base. Un segundo receptor (móvil) se instaló sobre las balizas ya sea con un trípode o bien con un tubo adaptador instalado sobre la baliza misma. Los tiempos de ocupación en cada baliza fueron de un mínimo de 10 minutos.

El equipo utilizado fue un sistema GNSS Trimble R6 de doble frecuencia, de propiedad de la DGA, y los datos obtenidos en terreno fueron procesados con el software Trimble Business Center.

Para calcular la posición de la estación base implementada para controlar los glaciares Bello y Yeso, llamada BBY1, se utilizaron las observaciones entre los días 26 y 29 de marzo de 2013, correspondientes a cuatro sesiones de medición estática de dicha estación, que completan más de 39 horas de observaciones, junto con los datos de la estación base permanente SANT ubicada al norte de Santiago. Los datos de la estación SANT provienen del International Global Positioning System (GPS) Service for Geodynamics (IGS) (<http://igs.cb.jpl.nasa.gov/>). La línea base entre SANT y la estación base BBY1 es de cerca de 82 km y las precisiones alcanzadas para la posición de BBY1 fueron del orden de 0,01 m en la horizontal y 0,02 m en la vertical, según se indica en la Tabla 2.3-A.

Tabla 2.3-A. Coordenadas de la estación base BBY1 al pie de los glaciares Bello y Yeso. "Altura" representa la altura elipsoidal según el sistema de referencia WGS 84, mientras que "Elevación" (m s.n.m.) es la altura ortométrica, calculada según el modelo geoidal EGM06.

COORDENADAS WGS84 PUNTO BASE BBY1			
Este (m)	413.357,30	Latitud (°)	S 33°32'50,63370"
Norte (m)	6.287.635,78	Longitud (°)	W 69°55'59,82397"
Elevación (m s.n.m.)	3825,79	Altura (m)	3856,19

El primer y segundo control de las posiciones de las balizas en el glaciar Bello se realizó el 30 de marzo y 24 de abril de 2013, respectivamente. Con estas mediciones se calculó la velocidad en cada punto durante este periodo, ver Tablas 2.3-B y C. La velocidad estimada para las balizas del glaciar Bello varía entre 4,91 cm/día y 1,12 cm/día, con un promedio de 2,75 cm/día.

Tabla 2.3-B. Coordenadas de las balizas sobre el glaciar Bello, al momento de su instalación a fines de marzo de 2013. Coordenadas expresadas en proyección UTM huso 19 sur, sistema geodésico WGS84.

Balizas glaciar Bello primera medición marzo 2013			
BALIZA	FECHA	COORDENADAS UTM	
		UTM E (m)	UTM N (m)
L1	30-03-2013	411.669,09	6.290.395,92
L2	30-03-2013	412.290,58	6.289.299,34
L3	30-03-2013	413.002,48	6.288.848,37
T1	30-03-2013	411.665,72	6.290.074,11
T2	30-03-2013	411.722,29	6.290.355,37
T3	27-03-2013	412.354,68	6.290.519,08
T4	30-03-2013	411.751,28	6.289.799,75
T5	30-03-2013	411.763,17	6.290.122,09
T6	30-03-2013	412.316,99	6.290.140,89
T7	30-03-2013	412.423,42	6.289.129,90
T8	30-03-2013	412.595,48	6.289.249,09
T9	30-03-2013	412.865,63	6.289.228,91

Tabla 2.3-C. Coordenadas de las balizas sobre el glaciar Bello durante la segunda medición el 24 de abril de 2013, y velocidades de flujo del glaciar en el periodo marzo-abril de 2013. El azimut de la velocidad está referido al norte geográfico. Coordenadas expresadas en proyección UTM huso 19 sur, sistema geodésico WGS84.

Balizas glaciar Bello segunda medición abril 2013					
BALIZA	FECHA	COORDENADAS UTM		VELOCIDAD	AZIMUT
		UTM E (m)	UTM N (m)	cm/día	grado sexagesimal
L1	29-04-2013	411.669,59	6.290.394,98	3,55	152
L2	29-04-2013	412.291,08	6.289.298,73	2,60	141
L3	29-04-2013	413.002,67	6.288.847,89	1,73	158
T1	29-04-2013	411.666,25	6.290.073,28	3,27	147
T2	29-04-2013	411.722,78	6.290.354,47	3,41	152
T3	29-04-2013	412.353,67	6.290.517,81	4,91	218
T4	29-04-2013	411.751,45	6.289.798,88	2,97	169
T5	29-04-2013	411.763,37	6.290.121,21	3,02	167
T6	29-04-2013	412.316,82	6.290.140,43	1,65	199
T7	29-04-2013	412.424,11	6.289.129,63	2,49	111
T8	29-04-2013	412.595,68	6.289.248,82	1,12	143
T9	29-04-2013	412.865,67	6.289.228,23	2,28	177

En el glaciar Yeso el primer y segundo control de posición de las balizas se realizó el 28-29 de marzo y el 29 de abril de 2013, respectivamente. Con estas mediciones se calculó la velocidad en cada punto durante este periodo, ver Tablas 2.3-D y E. Las velocidades estimadas varían entre 8,21 cm/día y 1,20 cm/día, con un promedio de 6,08 cm/día.

Tabla 2.3-D. Coordenadas de las balizas sobre el glaciar Yeso al momento de su instalación a fines de marzo 2013. Coordenadas expresadas en proyección UTM huso 19 sur, sistema geodésico WGS84.

Balizas glaciar Yeso primera medición marzo 2013			
BALIZA	FECHA	COORDENADAS UTM	
		NORTE	ESTE
L1	29-03-2013	6289652,63	414647,45
L2	28-03-2013	6288834,44	414486,12
L3	29-03-2013	6288036,54	413849,56
T1	29-03-2013	6289617,02	414556,37
T2	29-03-2013	6289566,44	414702,01
T3	29-03-2013	6289516,86	414916,39
T4	28-03-2013	6289035,14	414401,64
T5	28-03-2013	6289083,91	414670,87
T6	28-03-2013	6289160,32	414894,93
T7	29-03-2013	6288161,45	413919,37
T8	29-03-2013	6288104,61	413941,28
T9	29-03-2013	6288042,93	413971,64

Tabla 2.3-E. Coordenadas de las balizas sobre el glaciar Yeso a fines de abril 2013, y velocidades de flujo del glaciar en el periodo marzo-abril 2013. El azimut de la velocidad está referido al norte geográfico. Coordenadas expresadas en proyección UTM huso 19 sur, sistema geodésico WGS84.

Balizas glaciar Yeso segunda medición abril 2013					
BALIZA	FECHA	COORDENADAS UTM		VELOCIDAD	AZIMUT
		NORTE	ESTE	cm/día	grado sexagesimal
L1	29-04-2013	6.289.650,52	414.648,31	7,37	158
L2	29-04-2013	6.288.833,05	414.485,95	4,37	187
L3	29-04-2013	6.288.035,29	413.847,96	6,38	232
T1	29-04-2013	6.289.615,03	414.557,03	6,55	162
T2	29-04-2013	6.289.564,49	414.702,89	6,92	156
T3	29-04-2013	6.289.515,55	414.916,56	4,27	173
T4	29-04-2013	6.289.034,77	414.401,75	1,20	163
T5	29-04-2013	6.289.082,11	414.670,73	5,64	184
T6	29-04-2013	6.289.158,30	414.894,49	6,49	192
T7	29-04-2013	6.288.160,13	413.917,22	8,16	238
T8	29-04-2013	6.288.103,05	413.939,26	8,21	232
T9	29-04-2013	6.288.041,45	413.969,87	7,45	230

En la Fig. 2.3-A se presentan las velocidades estimadas en las balizas de los glaciares Bello y Yeso. En el glaciar Bello se observan mayores velocidades en la parte alta del glaciar, donde la pendiente es mayor. En el glaciar Yeso las velocidades estimadas son mayores a las del glaciar Bello, lo que se atribuye probablemente a la mayor pendiente del glaciar Yeso. En el glaciar Yeso las mayores velocidades se observan en la zona más alta y en la más baja del glaciar, las que presentan las mayores pendientes.

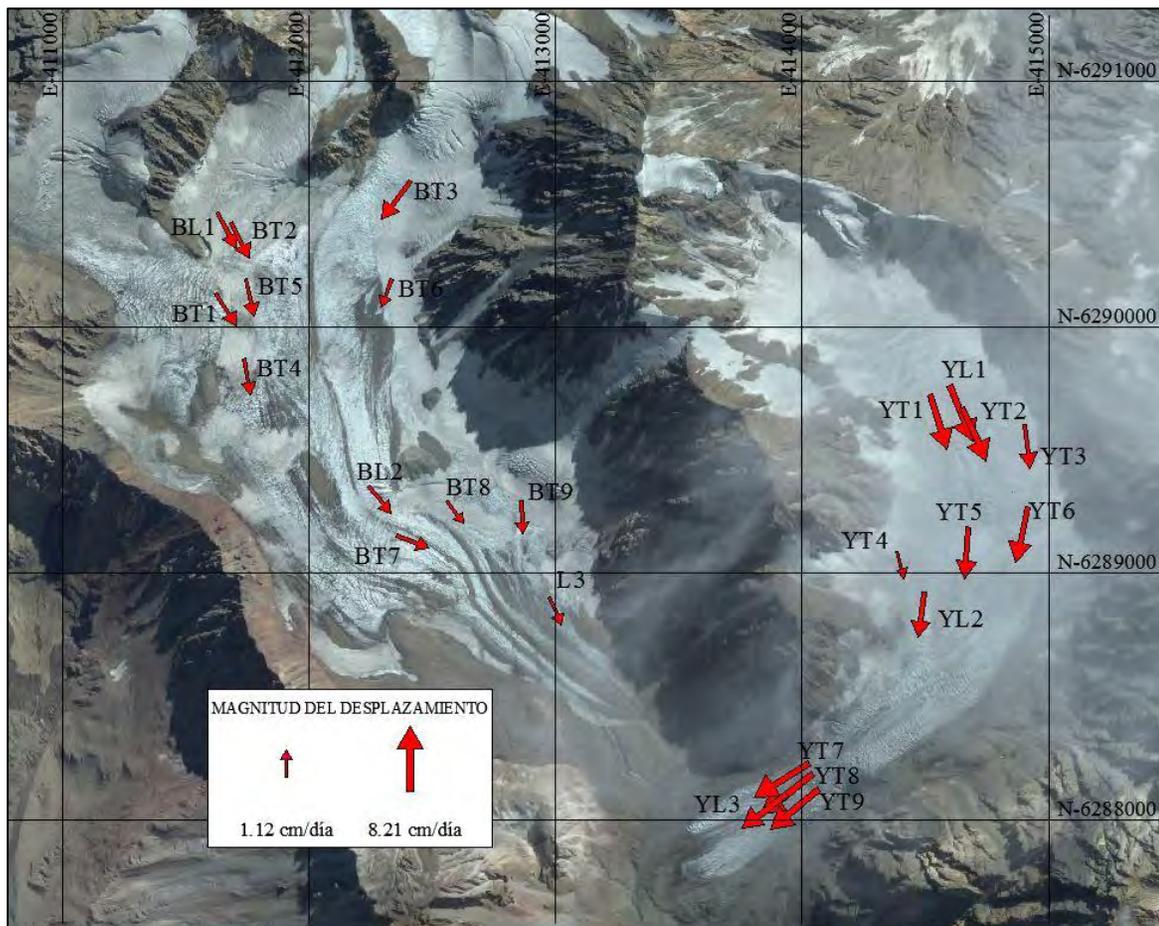


Fig. 2.3-A. Vectores de velocidad medidos en la superficie de los glaciares Bello y Yeso, entre marzo de 2013 y abril de 2013. Fuente de la imagen: Bing Maps.

2.4. METEOROLOGÍA

Para la caracterización meteorológica de los glaciares en la zona glaciológica central, se instalaron 2 estaciones meteorológicas con el objetivo de obtener información de detalle y determinar el balance de energía superficial (SEB).

Se instaló una estación tipo GEUS (De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland, Servicio Geológico de Dinamarca y Groenlandia), con trípode, en la zona de ablación del glaciar Bello (4160 m s.n.m.) durante el periodo de un mes, del 27 de marzo al 29 de abril del 2013. Asimismo se instaló una segunda estación tipo "Trípode", con sensores Vaisala, en la morrena en el margen occidental del glaciar Yeso sobre un sector de morrenas laterales ubicadas sobre una zona de séracs en la cota 4300 m s.n.m. La estación GEUS contaba con radiómetro y sensor de altura de nieve, mientras que la estación Trípode no contaba con ninguno de esos dos sensores. Las coordenadas de las estaciones se presentan en la Tabla 2.4-A.

Tabla 2.4-A. Coordenadas de las estaciones meteorológicas en la zona glaciológica Centro, medidas con GPS tipo navegador. Coordenadas expresadas en proyección UTM huso 19 sur, sistema geodésico WGS84. Cota expresada en m s.n.m.

Fecha	Glaciar	AWS	UTM E (m)	UTM N (m)	Cota (m)
28-03-2013	Yeso	Trípode	414.304	6.288.762	4.300
27-03-2013	Bello	GEUS	412.748	6.289.123	4.160

2.4.1. Temperatura del aire

En el glaciar Bello la temperatura del aire promedio fue de -1,7 °C, con una temperatura máxima de +7,4 °C y una mínima de -11,4 °C. En el glaciar Yeso la temperatura promedio fue de -2,3 °C, con una temperatura máxima de +8,5 °C y una mínima de -12,6 °C.

En la Fig.2.4.1-A se presentan los datos horarios medidos en la estación Bello y Yeso, donde se observa que la temperatura medida en la estación Bello es levemente mayor a

la temperatura de la estación Bello, probablemente debido a su menor altitud, sin embargo ambas se comportan de manera muy similar.

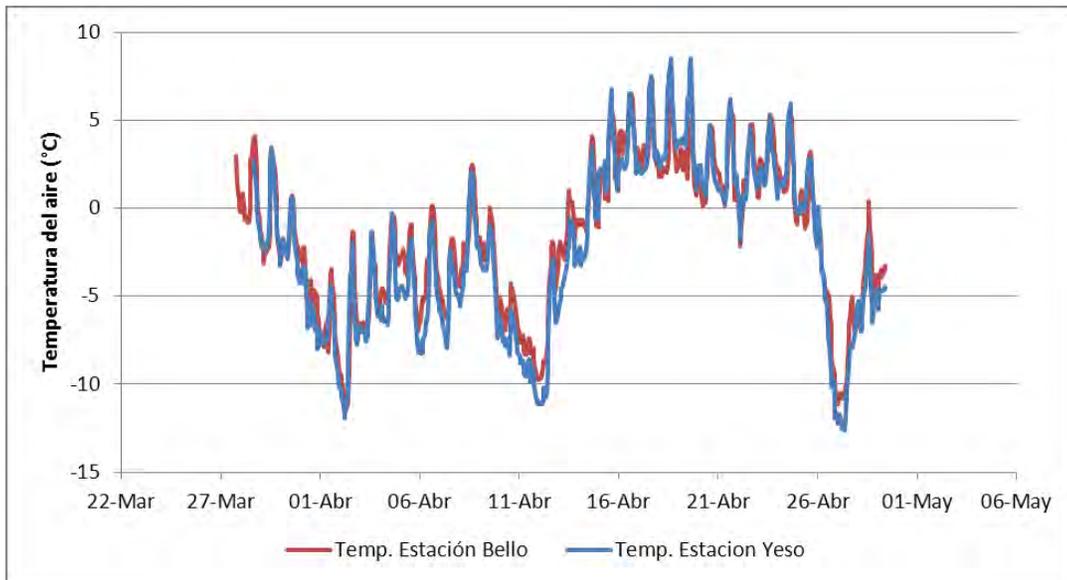


Fig. 2.4.1-A. Temperatura del aire promedio hora en las estaciones Bello y Yeso.

2.4.2. Humedad relativa

En la estación Bello la humedad relativa promedio en el periodo de registro fue de 31,6%, con un máximo de 95,8% y un mínimo de 4,4%. En la estación Yeso la humedad relativa promedio en el periodo de registro fue de 31,7%, con un máximo de 93,2% y un mínimo de 4,0%.

En la Fig. 2.4.2-A se presenta la humedad relativa horaria medida en las estaciones Bello y Yeso. Se observa que éstas son muy similares.

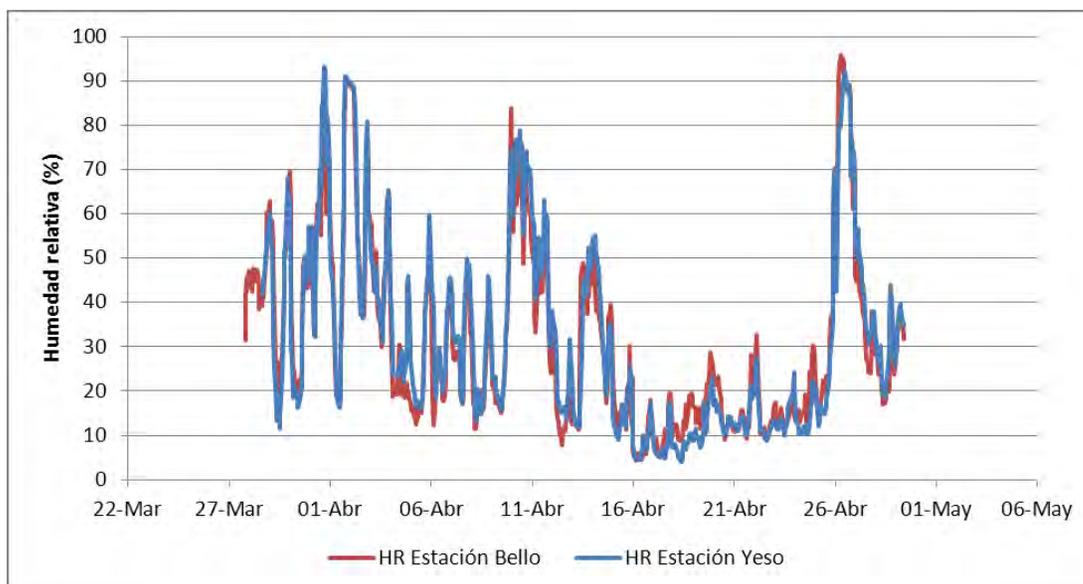


Fig. 2.4.2-A. Humedad relativa promedio hora en las estaciones Bello y Yeso.

2.4.3. Presión atmosférica

La presión promedio medida en la estación Bello (altitud 4160 m s.n.m.) en el periodo de registro fue de 618 mbar, con un máximo de 623 mbar y un mínimo de 581 mbar. En la estación Yeso (altitud 4300 m s.n.m.) la presión promedio en el periodo de registro fue de 605 mbar, con un máximo de 610 mbar y un mínimo de 600 mbar.

El gradiente de presión con la altitud entre las dos estaciones es de $-0,12$ mbar/m, muy similar al gradiente promedio esperado en la tropósfera baja de $-0,10$ mbar/m.

En la Fig. 2.4.3-A se presenta la presión atmosférica medida en las estaciones Bello y Yeso. Se observa que tienen un comportamiento muy similar con una diferencia sistemática debida al gradiente de presión con la altura.

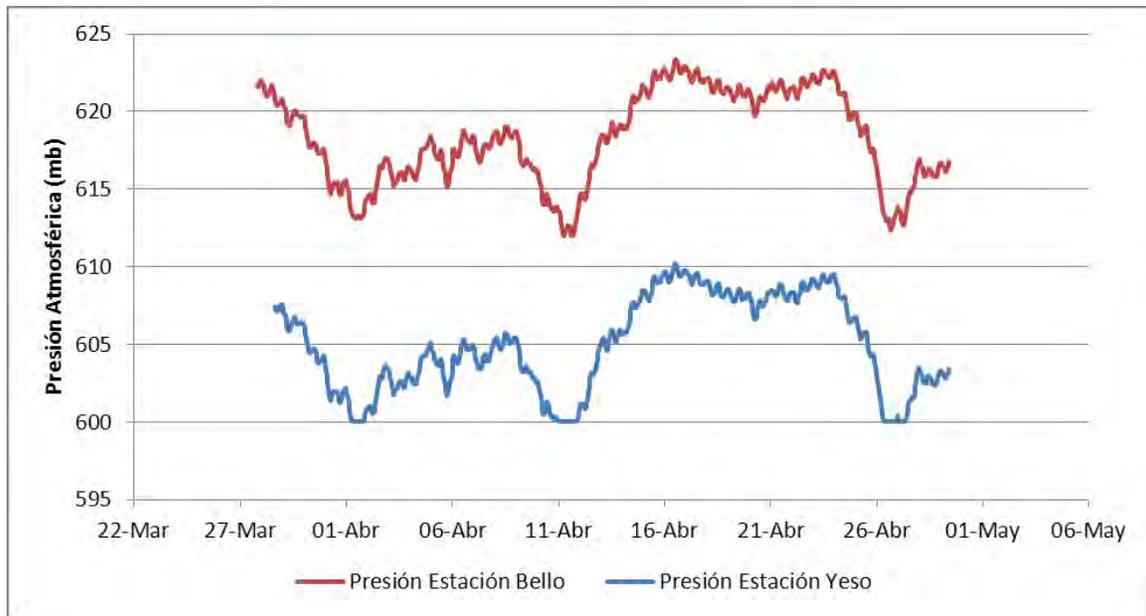


Fig. 2.4.3-A. Presión atmosférica promedio hora en las estaciones Bello y Yeso.

2.4.4. Velocidad y dirección del viento

En el periodo de registro la velocidad del viento promedio en la estación Bello fue de 3,1 m/s, con un máximo de 8,8 m/s. En la estación Yeso la velocidad del viento promedio en el periodo registrado fue de 3,5 m/s, con un máximo de 9,8 m/s. La mayor velocidad en la estación Yeso probablemente se debe a su mayor altitud.

En las Figs. 2.4.4-B y C se presentan las rosas de los vientos de las estaciones Bello y Yeso en el periodo registrado, y en la Fig. 2.4.4-D se presenta las rosas de los vientos en las ubicaciones de las estaciones. Se observa que la dirección del viento es heterogénea, con vientos predominantes del sur (S) y nor-este (NE) en ambas estaciones. El viento sur corresponde al viento que asciende por los valles y glaciares, mientras que el viento nor-este corresponde más a un régimen de circulación general en la zona.

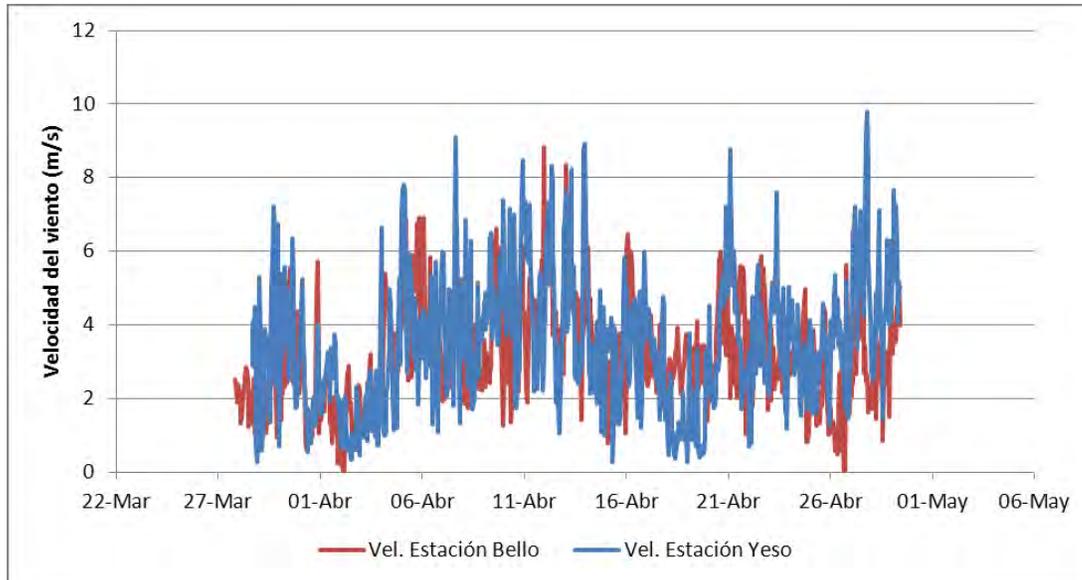


Fig. 2.4.4-A. Velocidad del viento promedio hora en las estaciones Bello y Yeso.

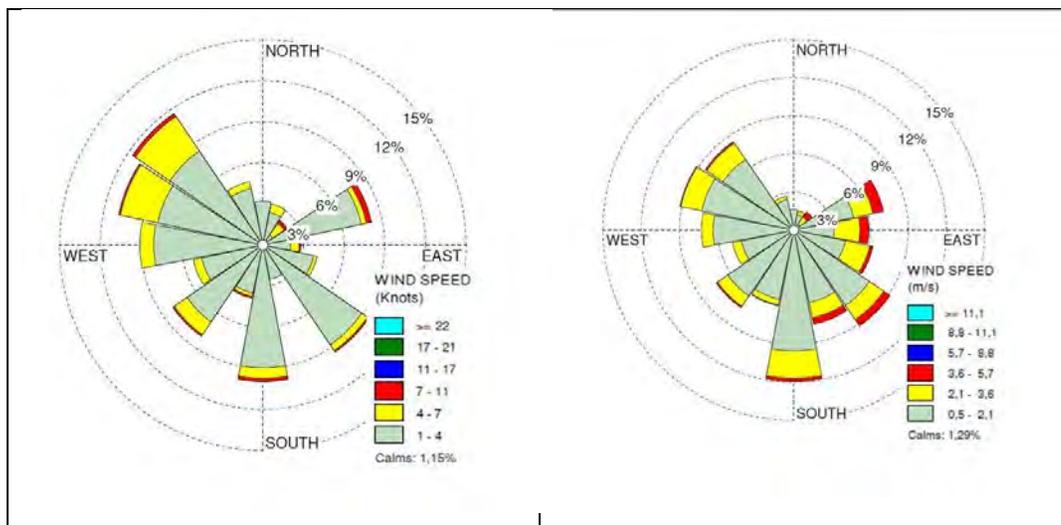


Fig. 2.4.4-B. Rosa de los vientos estación Bello.

Fig. 2.4.4-C. Rosa de los vientos estación Yeso.

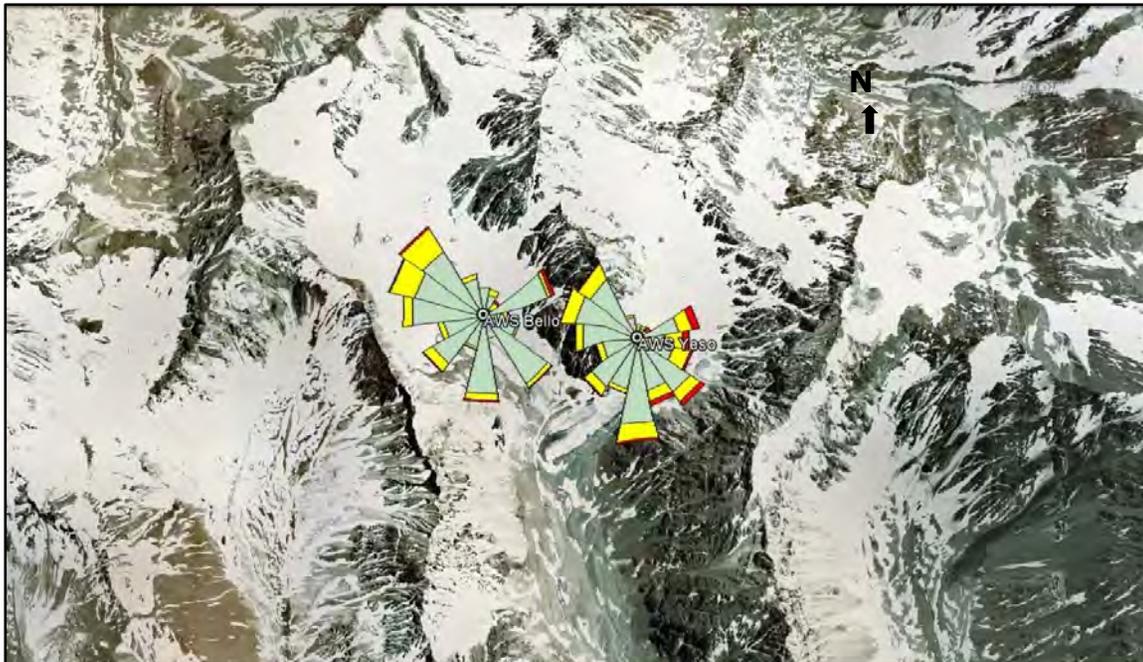


Fig. 2.4.4-D. Rosa de los vientos en las estaciones Bello y Yeso. Fuente de la imagen: Google Earth.

2.4.5. Altura de nieve

La altura de nieve medida en la estación Bello se presenta en la Fig. 2.4.5-A. A partir de los datos se observa que el sensor tiene un ruido constante de una amplitud de aproximadamente 3 cm. Este ruido está en el rango de error del sensor indicado por el fabricante (± 1 cm o 0,4% h, siendo h la altura), y está afectado probablemente por la vibración de la estación meteorológica con el viento.

A partir de la comparación de los datos de altura de nieve con los datos de radiación de onda corta incidente y humedad relativa se observa que ocurrieron 3 eventos de precipitación con un aumento de la altura de nieve los días 31 de marzo, 10 y 11 de abril y el 26 de abril.

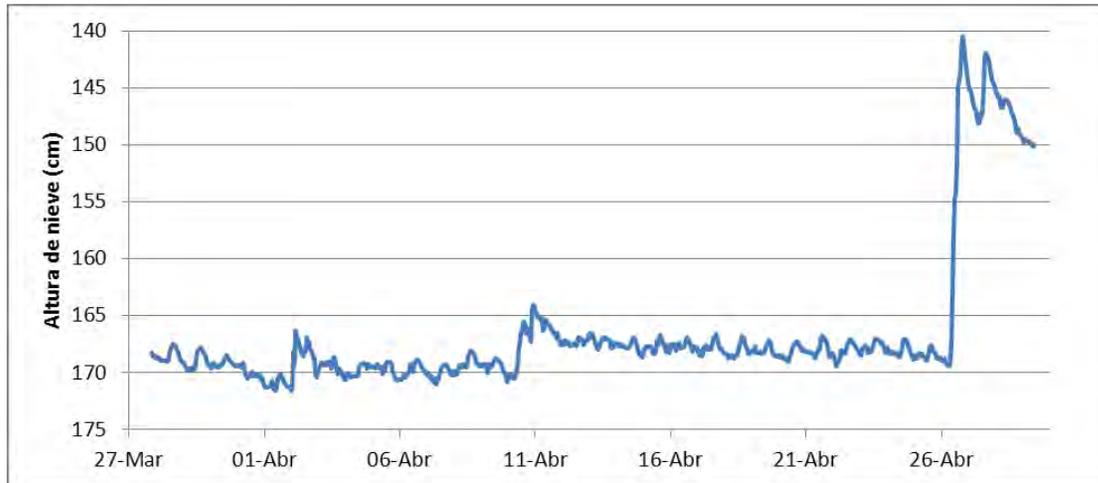


Fig. 2.4.5-A. Altura de nieve promedio hora en la estación Bello.

2.4.6. Radiación de onda corta

La radiación de onda corta incidente promedio en el periodo en la estación Bello fue de 308 W/m^2 y la radiación de onda corta promedio reflejada fue de 176 W/m^2 .

El albedo promedio en el periodo fue de 0,57 que corresponde a un valor característico para neviza (Cuffey y Paterson, 2010).

En la Fig. 2.4.6-A se presentan los valores horarios de la radiación de onda corta incidente y reflejada en la estación Bello. Se observa que los máximos de los ciclos diarios de la radiación de onda corta incidente disminuyen al avanzar la temporada debido a la disminución del ángulo de incidencia del sol. Se observan además los días nublados, cuando ocurrieron eventos de precipitación, que muestran menor radiación de onda corta incidente, que corresponden al 31 de marzo, 10 y 11 de abril y el 26 de abril.

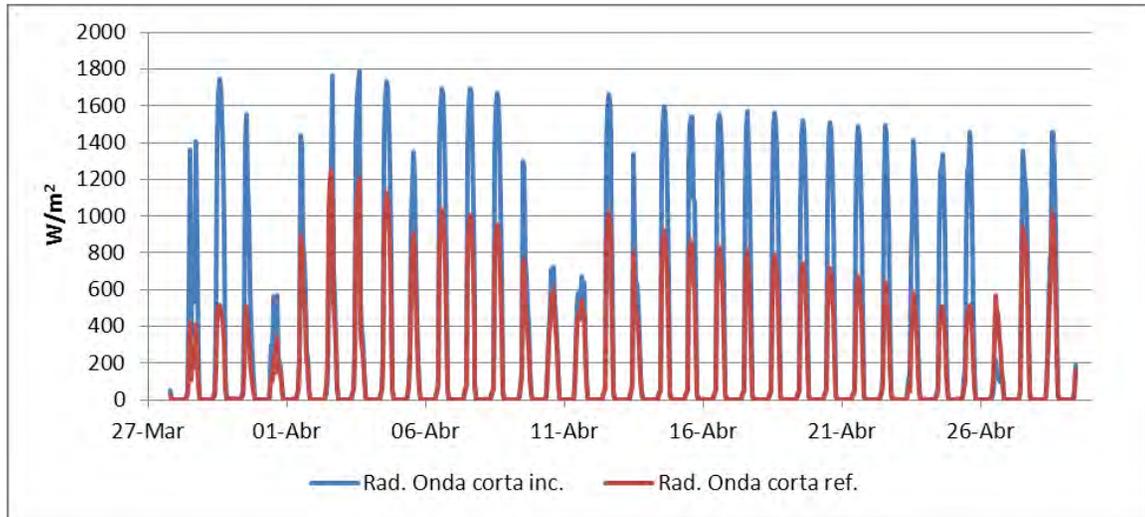


Fig. 2.4.6-A. Radiación de onda corta incidente (inc.) y reflejada (ref.) promedio hora en la estación Bello.

2.4.7. Radiación de onda larga

La radiación de onda larga incidente promedio en el periodo de registro en la estación Bello fue 229 W/m^2 y la radiación de onda larga emitida promedio fue de 288 W/m^2 .

En la Fig. 2.4.7-A se presentan los datos horarios de la radiación de onda larga incidente y reflejada en la estación Bello.

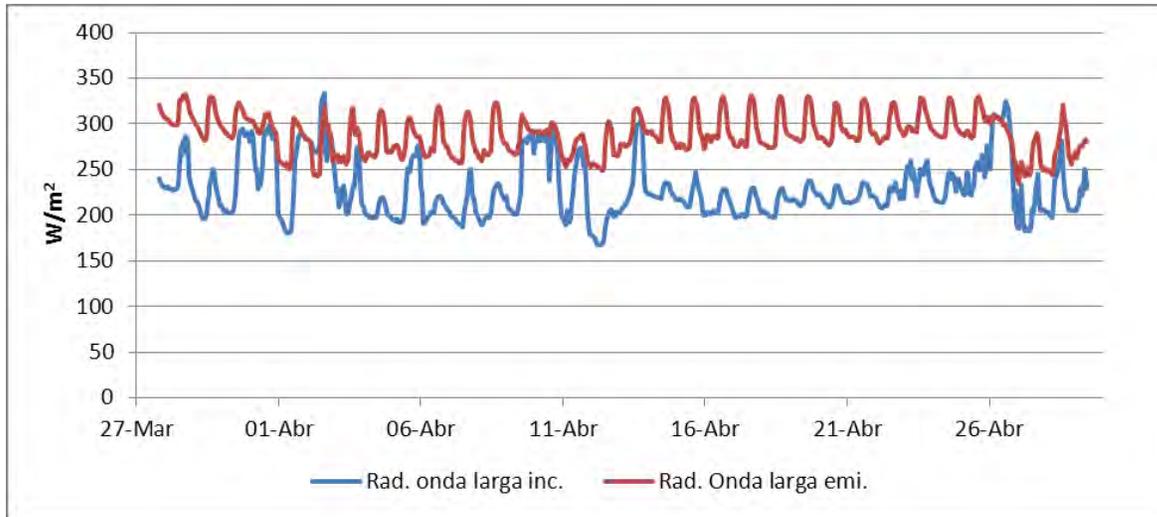


Fig. 2.4.7-A. Radiación de onda larga incidente (inc.) y emitida (emi.) promedio hora en la estación Bello.

2.5. BALANCES

2.5.1. Balance glaciológico

El balance de masa glaciológico en un glaciar corresponde a la estimación de ganancia o pérdida de masa durante un cierto periodo de tiempo. El balance de masa anual neto corresponde a la diferencia entre la masa ganada en la temporada de acumulación y perdida en la temporada de ablación, e indica si el glaciar se encuentra en equilibrio o está perdiendo o ganando masa.

Para estimar la ganancia o pérdida de masa superficial en un glaciar mediante el método glaciológico tradicional con balizas se utilizan balizas o marcos enterrados en la superficie del glaciar que permiten registrar la altura de la superficie en distintas fechas, con cuyos registros se estima la ganancia o pérdida de masa entre las fechas registradas. Si la superficie no está compuesta por hielo se debe medir la densidad de la nieve. En nuestro caso tanto en el glaciar Bello como en el glaciar Yeso la superficie a fines de marzo y fines de abril de 2013 correspondía a hielo.

Para estimar el balance de masa de los glaciares Bello y Yeso se instalaron 12 balizas distribuidas entre las áreas de acumulación y ablación de cada glaciar (ver Figs. 2.5.1-A y B).

Las balizas utilizadas correspondieron a coligües de aproximadamente 2,5 m de largo y 1” de diámetro promedio. Para instalar cada baliza, se perforó 1,9 m en promedio de manera de dejar 0,6 m de altura de coligüe a la vista (fuera del hielo), para que en caso de acumulaciones de nieve debido a posibles tormentas de otoño, las balizas no quedaran cubiertas bajo el manto, y por otro lado, 1,9 m de baliza bajo la superficie del hielo aseguraría la mantención en su sitio original aun en caso de ablaciones extremas.

Las fechas de control de altura de balizas en el glaciar Bello son el 27 al 30 de marzo, que corresponde a la fecha de instalación y primer control, y el 29 de abril que corresponde al segundo control. Las fechas de registro de altura de balizas en el glaciar Yeso son el 28 al 30 de marzo, que corresponde a la fecha de instalación y primer control, y el 29 de abril que corresponde al segundo control.

La estimación de la altura perdida en el periodo registrado se calcula restando la altura de las balizas sobre la superficie, entre las dos fechas controlados. Luego para calcular el equivalente en agua (eq.a.) se multiplica la diferencia de alturas por la densidad. En la fecha de instalación entre el 27 y 30 de marzo se observó en terreno que la superficie de los glaciares donde se instalaron las balizas correspondía a hielo, por lo que el cálculo de masa se realizó con una densidad igual a $0,9 \text{ g/cm}^3$.

La ablación promedio estimada en el glaciar Bello entre el 28 de marzo y 30 de abril es de 5 cm eq.a., con una tasa promedio de 0,2 cm eq.a./día, una tasa bastante pequeña ya que el mes de abril corresponde al fin de la temporada de ablación. En la Tabla 2.5.1-A se presentan los datos de cada baliza del glaciar Bello. Se observa que la baliza con mayor ablación corresponde a la baliza L2 que se encuentra en la zona baja del glaciar (zona de ablación) y las balizas T5 y T6 que se encuentran en la zona central. La ablación no se comporta proporcional a la altura del glaciar sino es más bien irregular en las distintas áreas, probablemente afectada, entre otros efectos, por condiciones locales de insolación.

La ablación promedio estimada en el glaciar Yeso en el mes de abril fue de 4 cm eq.a. con una tasa de 0,1 cm eq.a./día (Tabla 2.5.1-B), que corresponde a una tasa bastante pequeña al igual que en el glaciar Bello ya que corresponde al fin de la temporada de ablación. Las mayores ablaciones se registraron en las balizas L3, T7 y T9 que se encuentran en la zona baja del glaciar (zona de ablación).

Tabla 2.5.1-A. Datos de balizas en el glaciar Bello.

Glaciar	Baliza	Elevación (m s.n.m.)	Fecha instalación	Fecha control	Cant. de días	Dif. (cm)	Ablación (cm eq.a.)	Tasa ablación (cm eq.a./día)
Bello	L1	4435	30-03-2013	29-04-2013	30	3	3	0,1
Bello	L2	4270	27-03-2013	29-04-2013	33	12	11	0,3
Bello	L3	4078	27-03-2013	29-04-2013	33	5	5	0,1
Bello	T1	4384	30-03-2013	29-04-2013	30	4	4	0,1
Bello	T2	4413	27-03-2013	29-04-2013	33	2	2	0,0
Bello	T3	4479	27-03-2013	29-04-2013	33	4	3	0,1
Bello	T4	4340	30-03-2013	29-04-2013	30	6	5	0,2
Bello	T5	4380	27-03-2013	29-04-2013	33	9	8	0,2
Bello	T6	4397	27-03-2013	29-04-2013	33	9	8	0,2
Bello	T7	4179	30-03-2013	29-04-2013	30	4	4	0,1
Bello	T8	4182	29-03-2013	29-04-2013	31	4	3	0,1
Bello	T9	4164	30-03-2013	29-04-2013	30	4	4	0,1
Promedio							5	0,2

Tabla 2.5.1-B. Datos de balizas en el glaciar Yeso.

Glaciar	Baliza	Elevación (m s.n.m.)	Fecha instalación	Fecha control	Cant. de días	Dif. (cm)	Ablación (cm eq.a.)	Tasa ablación (cm eq.a./día)
Yeso	L1	4505	29-03-2013	29-04-2013	31	3	3	0,1
Yeso	L2	3971	28-03-2013	29-04-2013	32	5	4	0,1
Yeso	L3	4494	29-03-2013	29-04-2013	31	7	6	0,2
Yeso	T1	4431	29-03-2013	29-04-2013	31	3	2	0,1
Yeso	T2	4437	29-03-2013	29-04-2013	31	3	3	0,1
Yeso	T3	4290	29-03-2013	29-04-2013	31	3	3	0,1
Yeso	T4	4279	28-03-2013	29-04-2013	32	5	4	0,1
Yeso	T5	4301	28-03-2013	29-04-2013	32	4	4	0,1

Glaciar	Baliza	Elevación (m s.n.m.)	Fecha instalación	Fecha control	Cant. de días	Dif. (cm)	Ablación (cm eq.a.)	Tasa ablación (cm eq.a./día)
Yeso	T6	4012	28-03-2013	29-04-2013	32	5	4	0,1
Yeso	T7	4009	29-03-2013	29-04-2013	31	6	5	0,2
Yeso	T8	4000	29-03-2013	29-04-2013	31	4	4	0,1
Yeso	T9	4505	29-03-2013	29-04-2013	31	5	5	0,1
Promedio						4	4	0,1

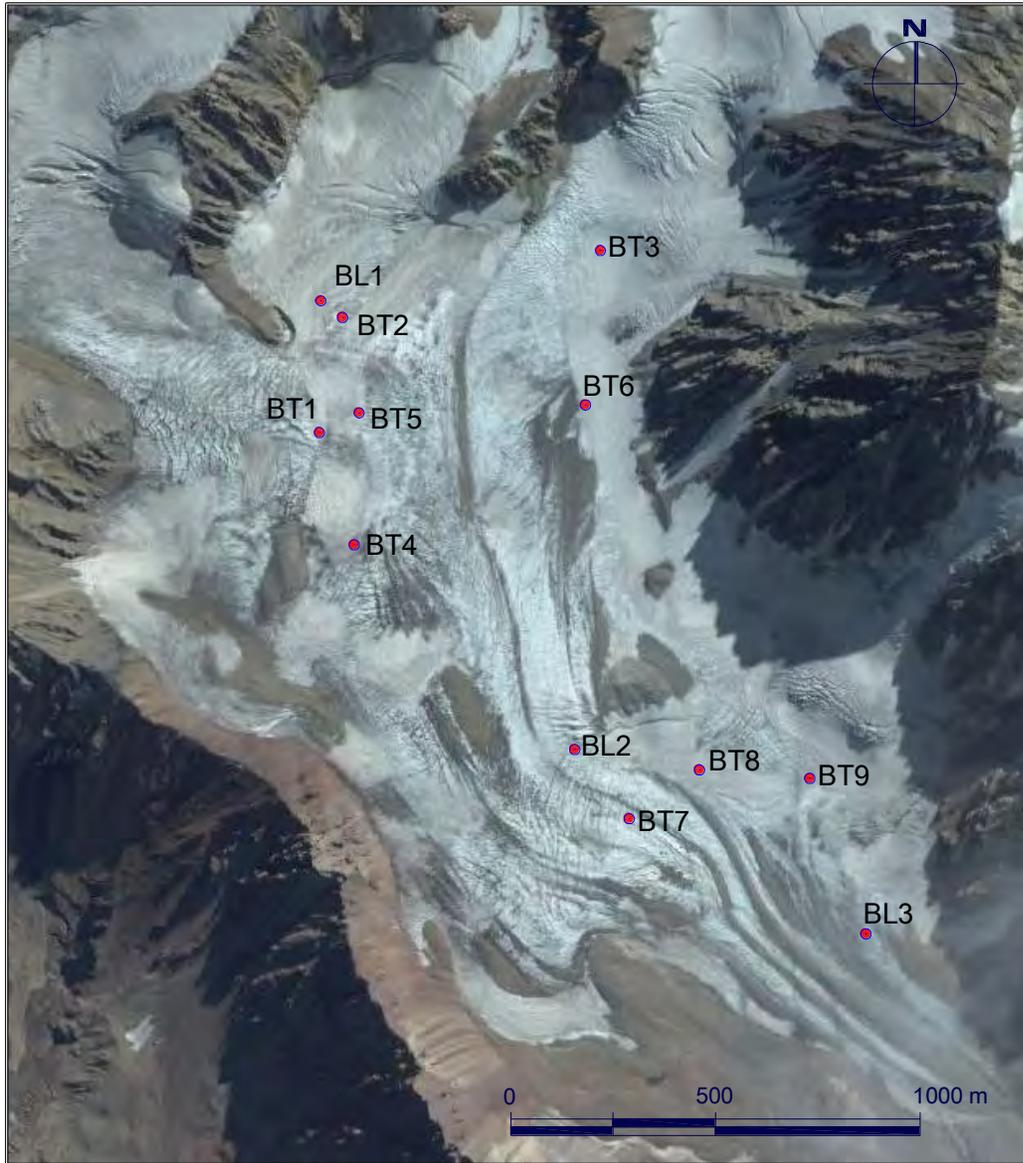


Fig. 2.5.1-A. Ubicación de las balizas en glaciar Bello. Fuente de la imagen: Bing Maps.

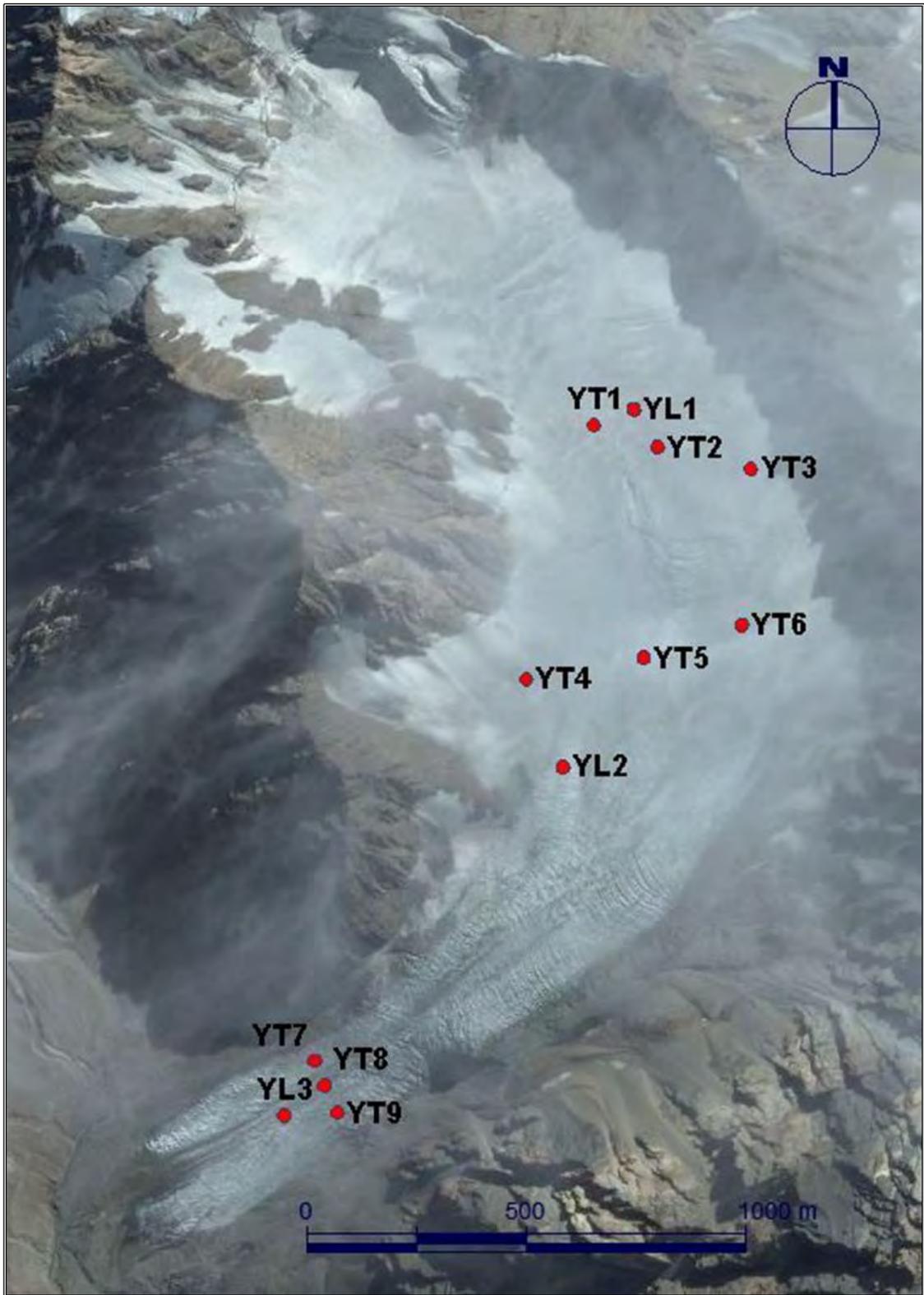


Fig. 2.5.1-B. Ubicación de las balizas en glaciar Yeso. Fuente de la imagen: Bing Maps.

Para estimar el volumen del balance en todo el glaciar se extrapolaron mediante polígonos de Thiessen los datos de ablación de las balizas (cm eq.a.) a todo el glaciar (ver Fig. 2.5.1-C). El resultado estimado para el periodo marzo-abril de 2013 corresponde a pérdidas de 196.909 m³ eq.a. para el glaciar Bello y de 67.809 m³ eq.a. para el glaciar Yeso.

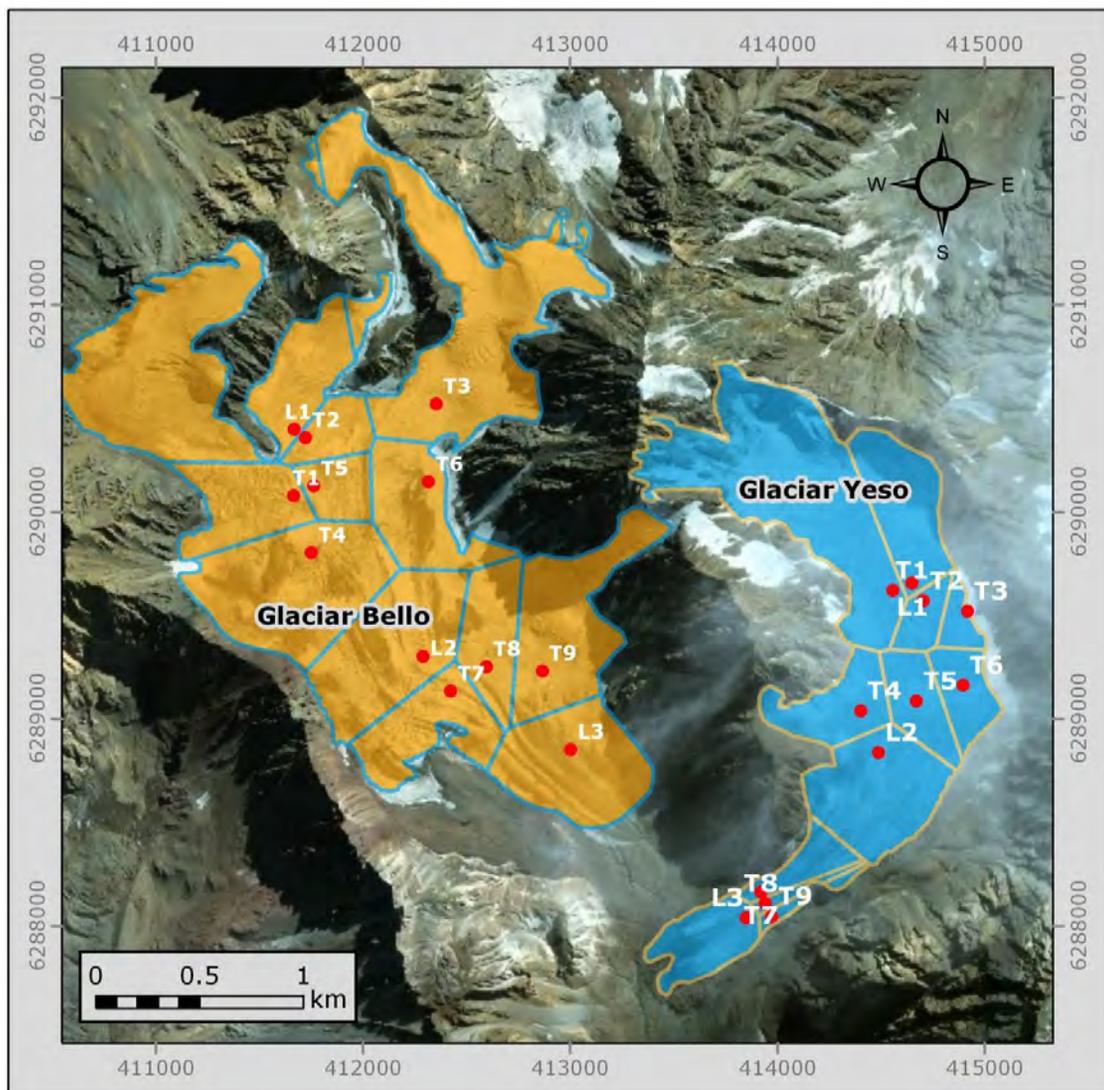


Fig. 2.5.1-C. Polígonos de Thiessen creados para la extrapolación de datos en los glaciares Bello y Yeso. Imagen de fondo Worldview 2, Marzo 2010.

2.5.2. Balance geodésico

Para la realización del balance geodésico se compararon los datos del levantamiento LIDAR de los glaciares Yeso y Bello realizado por la empresa Digimapas con fecha 22-24 de abril de 2012, con los datos del levantamiento cinemático DGPS efectuado en transectas a pie por la superficie de los glaciares en marzo y noviembre de 2013.

A partir del modelo digital de elevación (DEM según sus siglas en inglés) LIDAR de abril de 2012-2013, disponible a una resolución espacial de 1 m, se interpolaron curvas de nivel a intervalos de 1 m, y se construyó una estructura TIN (Triangulated Irregular Network), mediante la cual se obtuvieron valores de elevación en cada una de las posiciones donde existían datos GPS terrestre de 2013.

En las Figs. 2.5.2-A y C se muestran las curvas de nivel interpoladas a partir del DEM LIDAR original y en las Figs. 5.5.2-B y D la estructura TIN construida. En todas las figuras se muestran los levantamientos DGPS realizados. En la Fig. 2.5.2-E se muestra un detalle del glaciar Yeso en el que se puede comparar las curvas de nivel originales, la triangulación realizada y el levantamiento DGPS en el sector donde se ubica la baliza de ablación YT9.

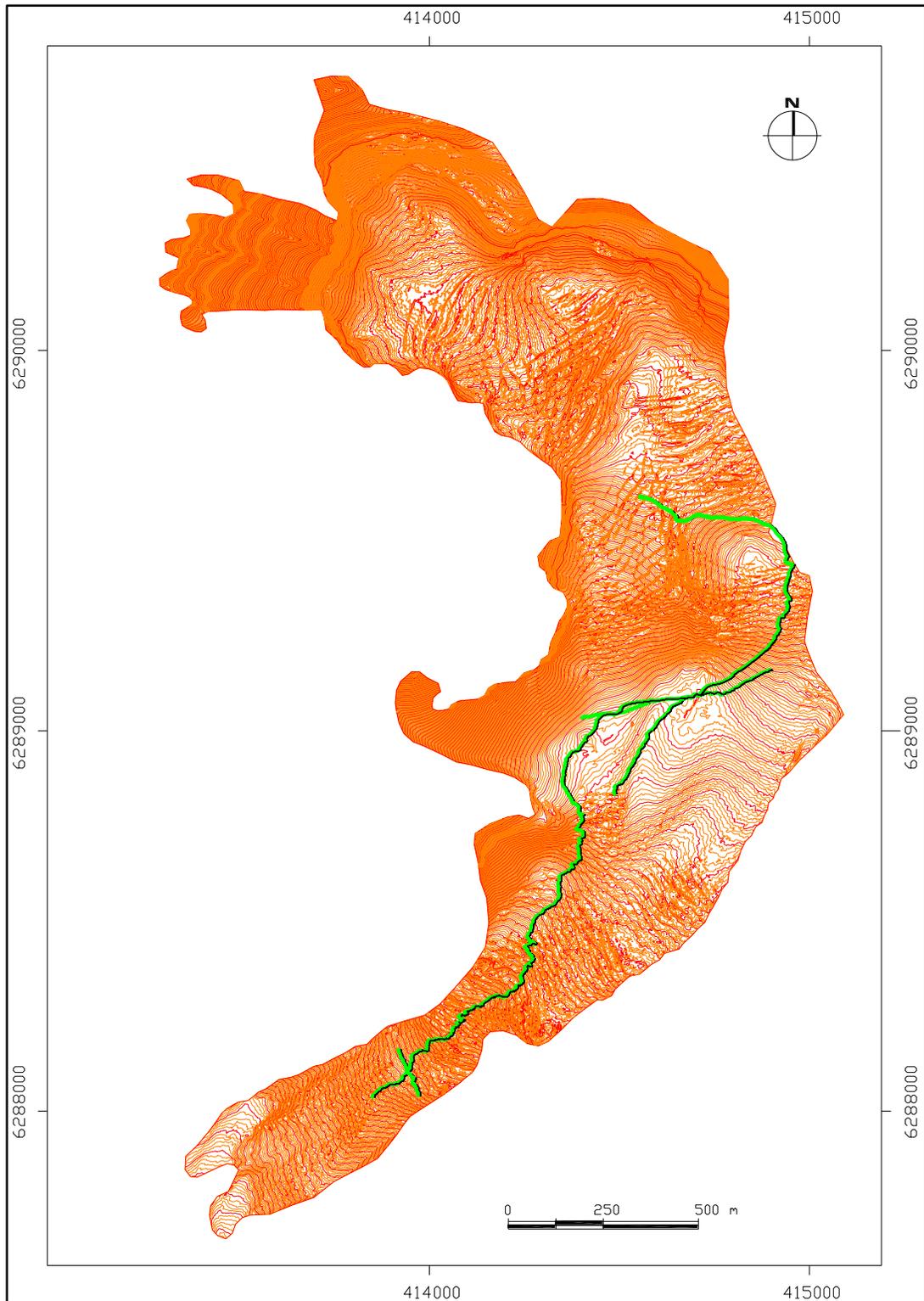


Fig. 2.5.2-A. Curvas de nivel obtenidas para el glaciar Yeso a partir del levantamiento LIDAR de abril de 2012. En color verde el levantamiento DGPS cinemático realizado en marzo de 2013.

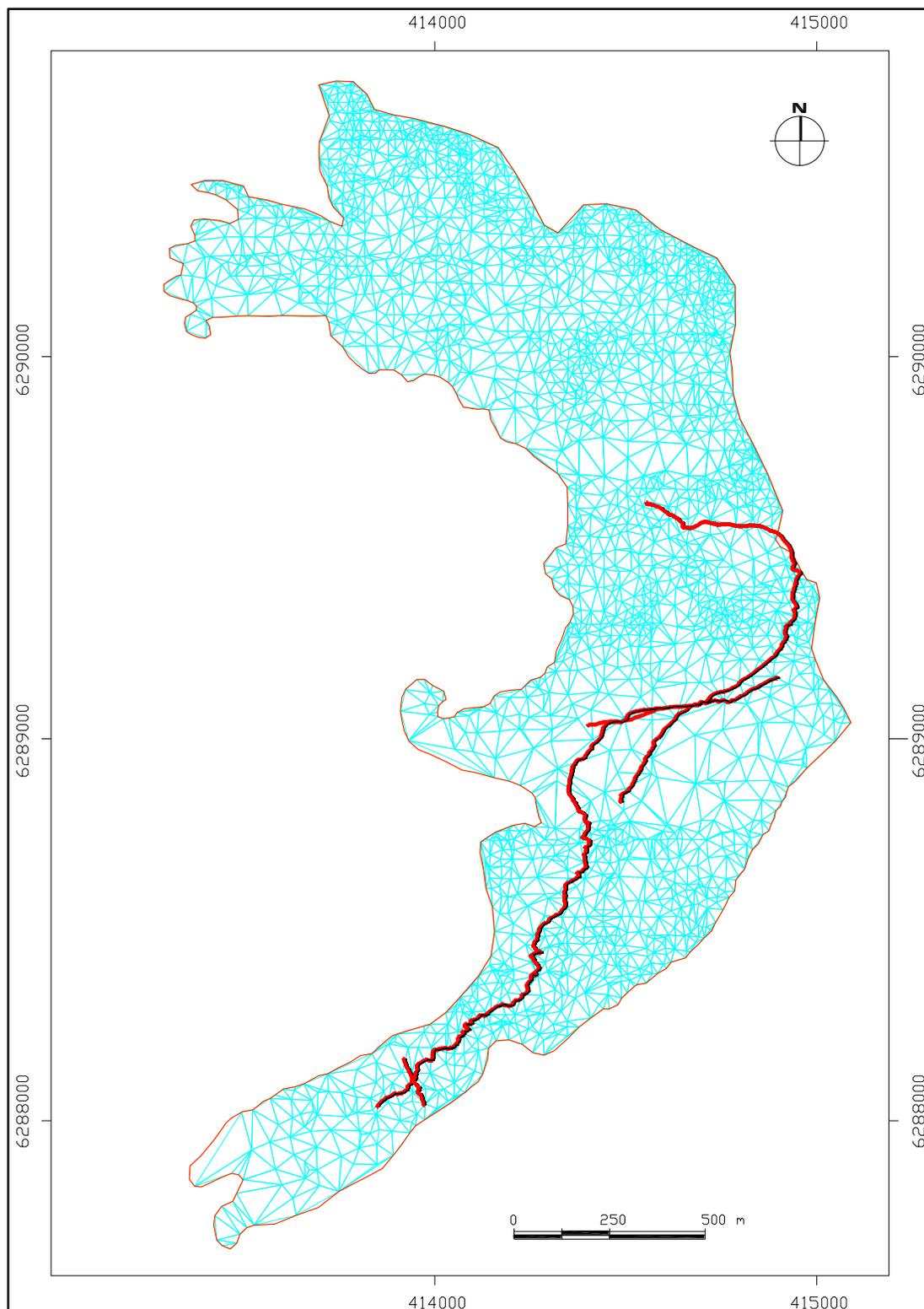


Fig. 2.5.2-B. En color rojo el levantamiento cinemático DGPS realizado en marzo de 2013 sobre el glaciar Yeso y en cyan el TIN generado a partir de las curvas de nivel obtenidas del levantamiento LIDAR de abril de 2012.

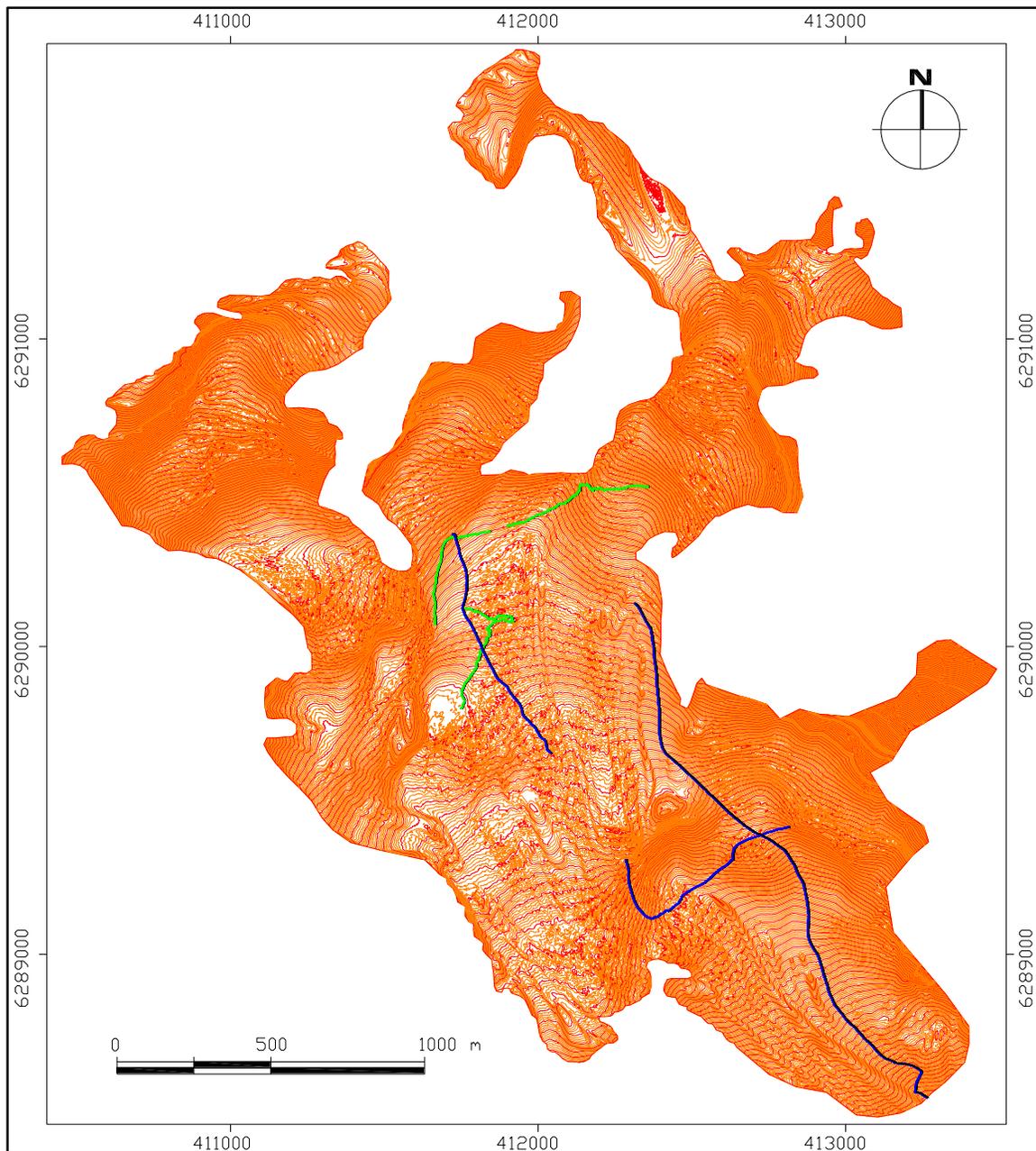


Fig. 2.5.2-C. Curvas de nivel obtenidas a partir del levantamiento LIDAR en abril de 2012 en el glaciar Bello. En color verde el levantamiento cinemático realizado en marzo de 2013 y en azul el levantamiento cinemático de noviembre de 2013.

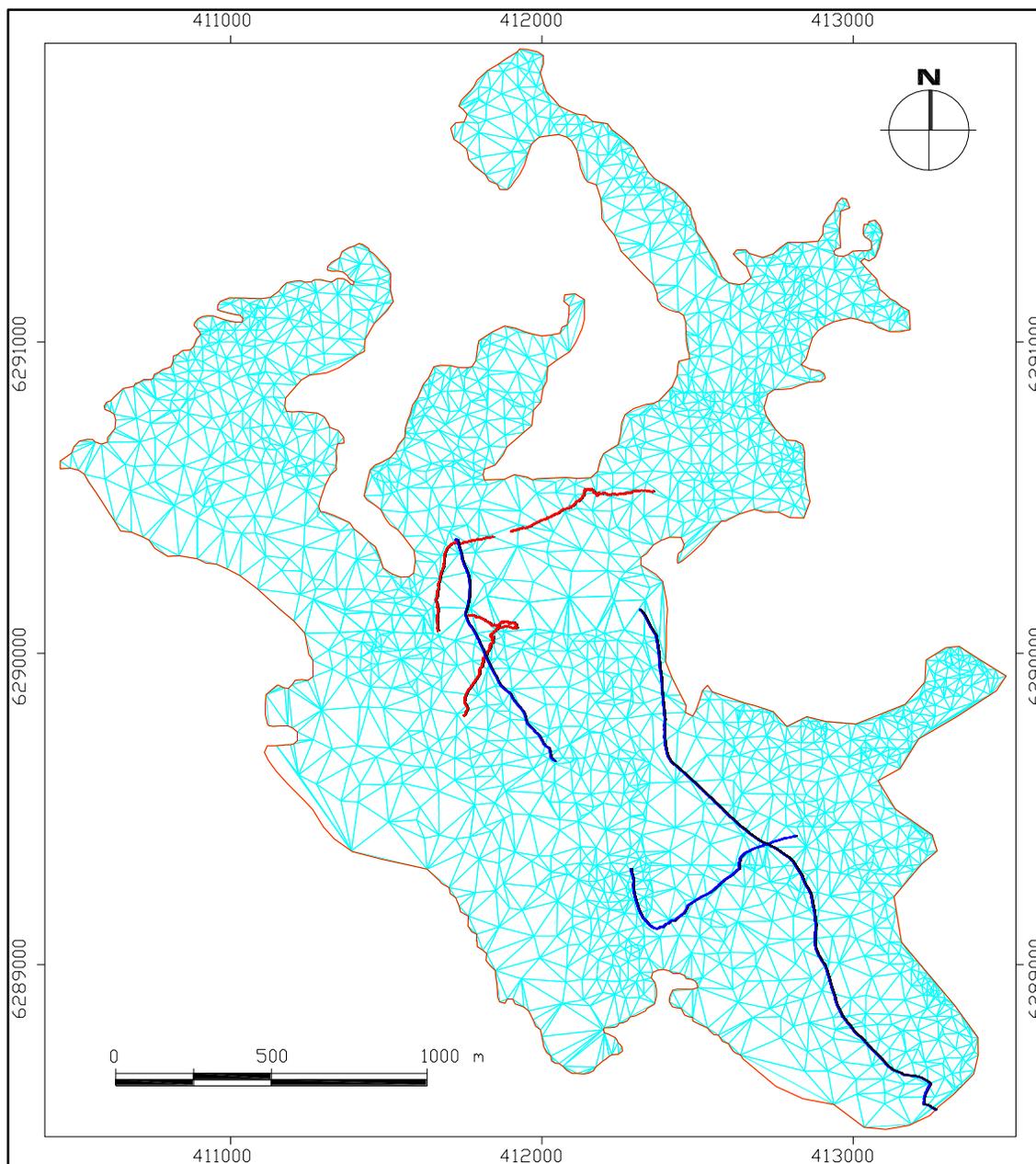


Fig. 2.5.2-D. En color rojo el levantamiento DGPS cinemático realizado en marzo de 2013 en el glaciar Bello, en azul el levantamiento cinemático DGPS de noviembre de 2013 y en cian el TIN generado a partir de las curvas de nivel obtenidas del levantamiento LIDAR de abril de 2012.

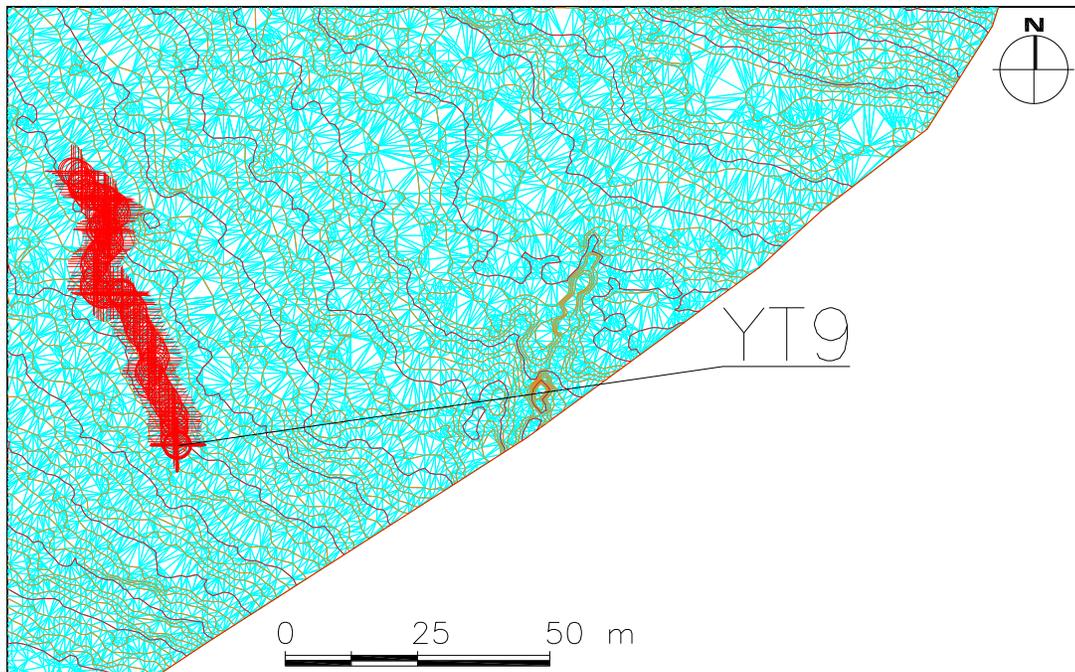


Fig. 2.5.2-E. Curvas de nivel originales con un intervalo de 1 m (color naranja), el TIN creado (color cyan), y los puntos del levantamiento cinemático (cruces de color rojo a la izquierda) para el sector de la baliza YT9 del glaciar Yeso. El borde derecho inferior del TIN y las curvas denivel corresponde al margen oriental del glaciar Bello según los datos del levantamiento LIDAR de abril de 2012, vale decir el color blanco indica terreno desglaciado.

Una vez obtenidas las cotas del levantamiento LIDAR para los puntos de los levantamientos DGPS se calculó las diferencias de alturas (ΔH). En la Figs. 2.5.2-F, G y H se muestran estas diferencias para ambos glaciares y fechas. En el glaciar Yeso las diferencias varían entre +8,9 m y -3,6 m, entre +3,7 m y -2,7 m en el glaciar Bello para el levantamiento DGPS de marzo de 2013, y entre +7,6 m y -1,6 m en el glaciar Bello para el levantamiento DGPS de noviembre de 2013.

En cuanto a errores, la precisión de las alturas DGPS de 2013 es del orden de 10 cm (sección 2.2.3.), mientras que la precisión de las alturas LIDAR es del orden de 20 cm, resultando en un error de cuadratura (raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de los errores de las dos alturas) de 22 cm. En base a este error, podemos considerar entonces que la diferencia de altura de la superficie del glaciar medida entre 2013 y el periodo estival 2012-2013 es real.

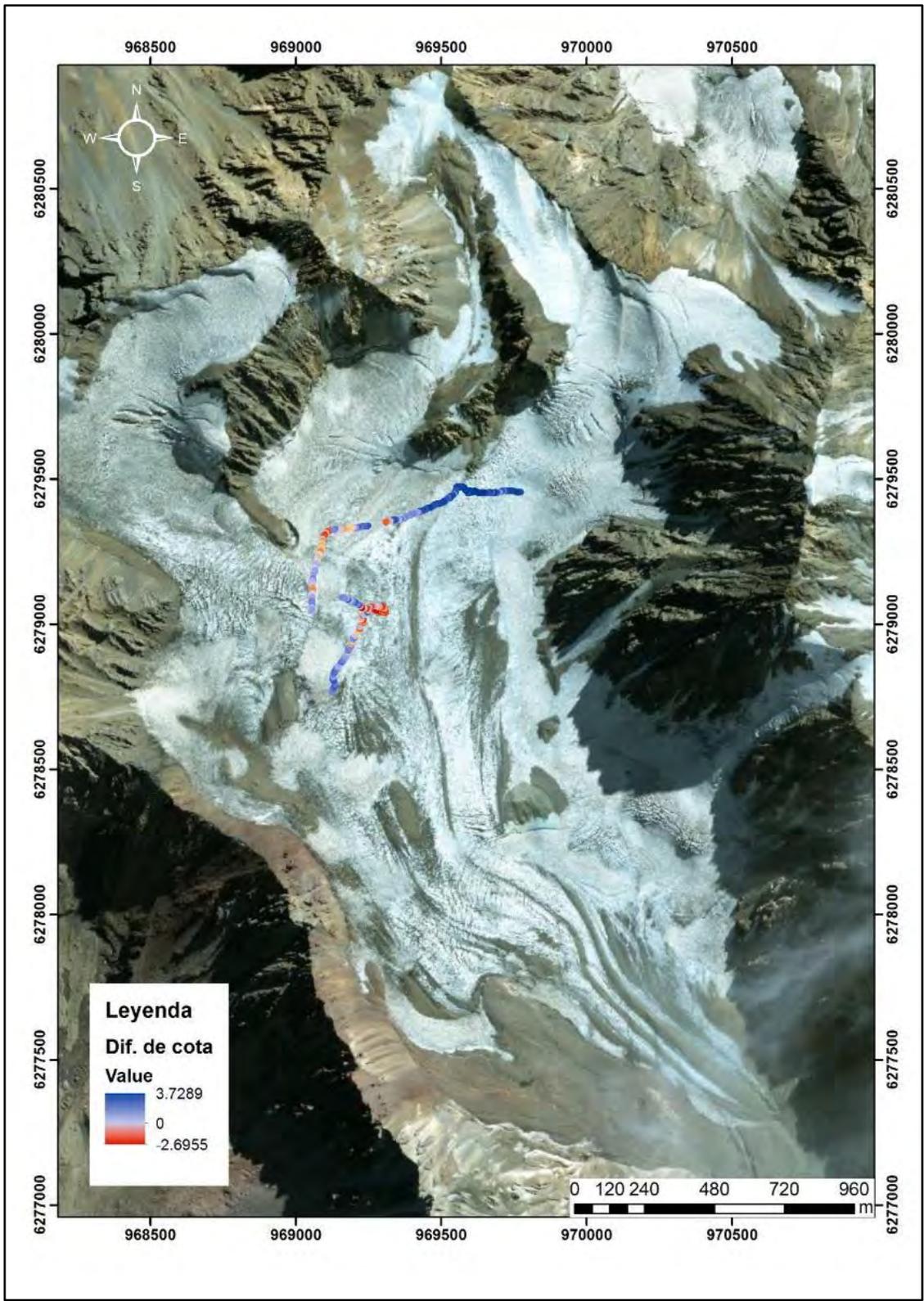


Fig. 2.5.2-F. Diferencia de cota (m) entre el levantamiento DGPS de marzo de 2013 y el LIDAR de abril de 2012, glaciar Bello.

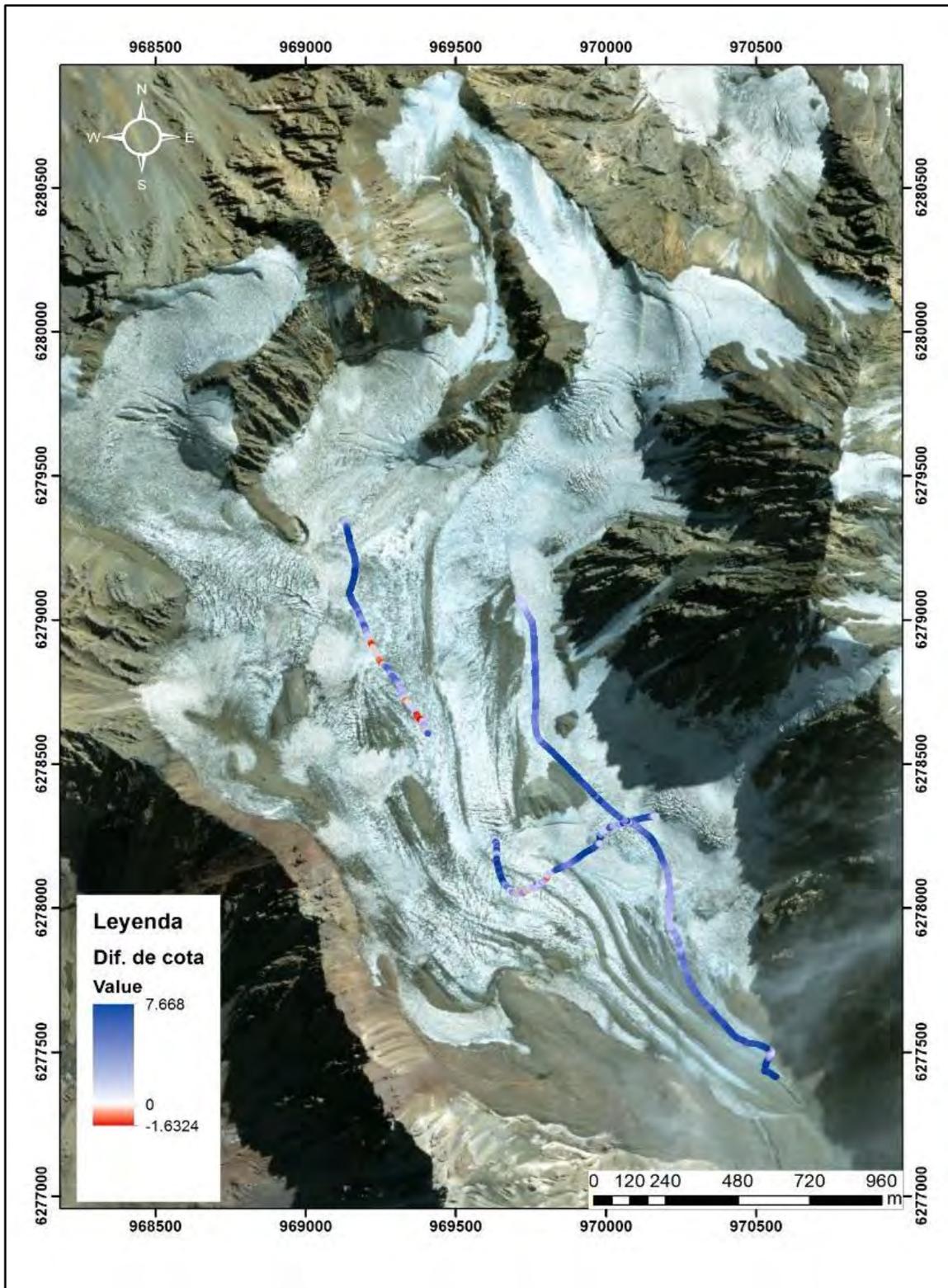


Fig. 2.5.2-G. Diferencia de cota (m) entre el levantamiento DGPS de noviembre de 2013 y el LIDAR de abril de 2012, glaciar Bello.

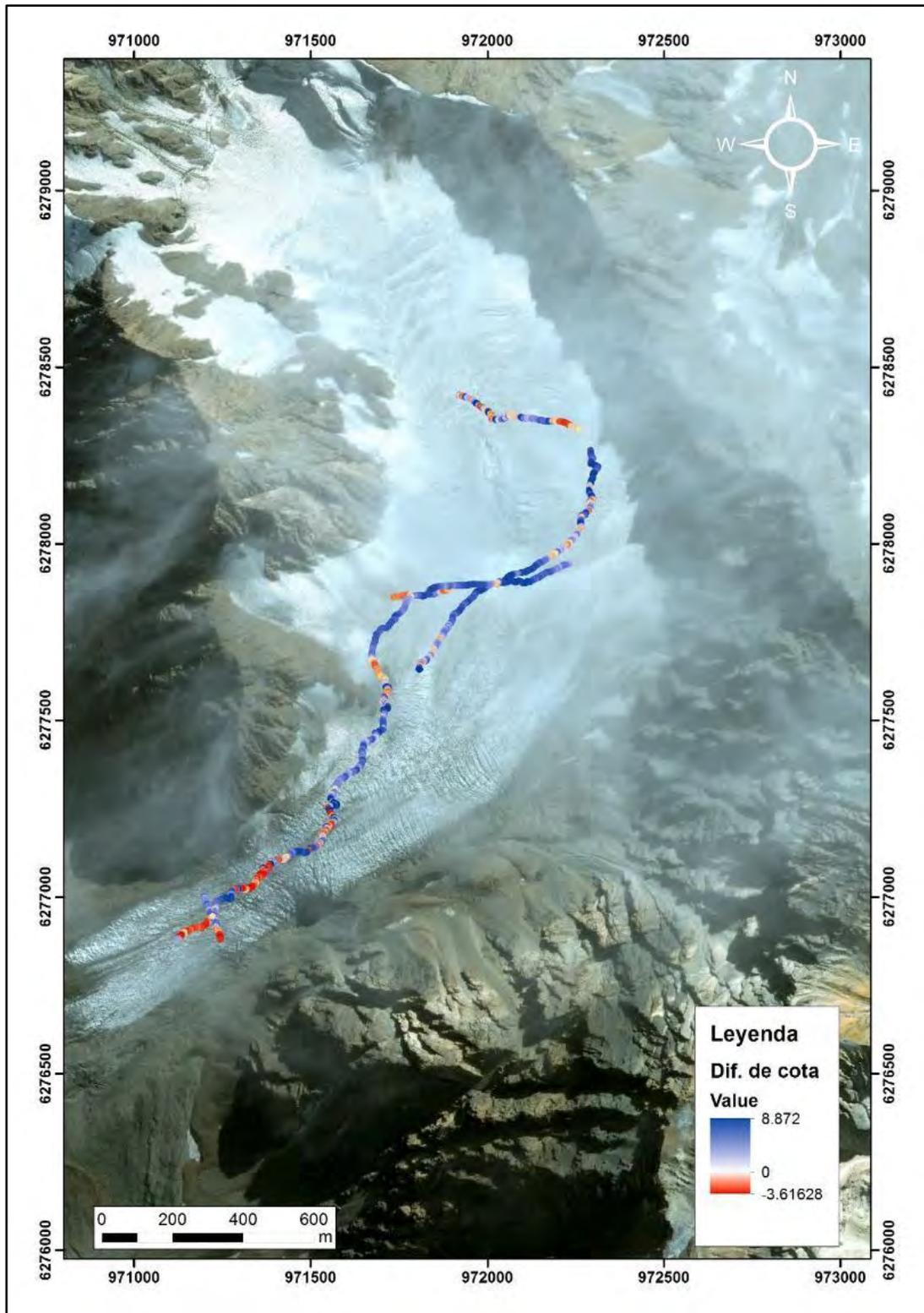


Fig. 2.5.2-H. Diferencia de cota (m) entre el levantamiento DGPS de marzo de 2013 y el LIDAR de abril de 2012, glaciar Yeso.

A partir de las diferencias de cota medidas se ha procedido a calcular el balance de masa geodésico para cada glaciar. Se correlacionó las diferencias de cota (ΔH) con la cota de los levantamientos DGPS buscando una tendencia de ΔH con la cota, pero los bajos coeficientes de correlación obtenidos nos han inclinado a descartar esta hipótesis. En las Figs. 2.5.2-I, J y K se muestran los resultados obtenidos.

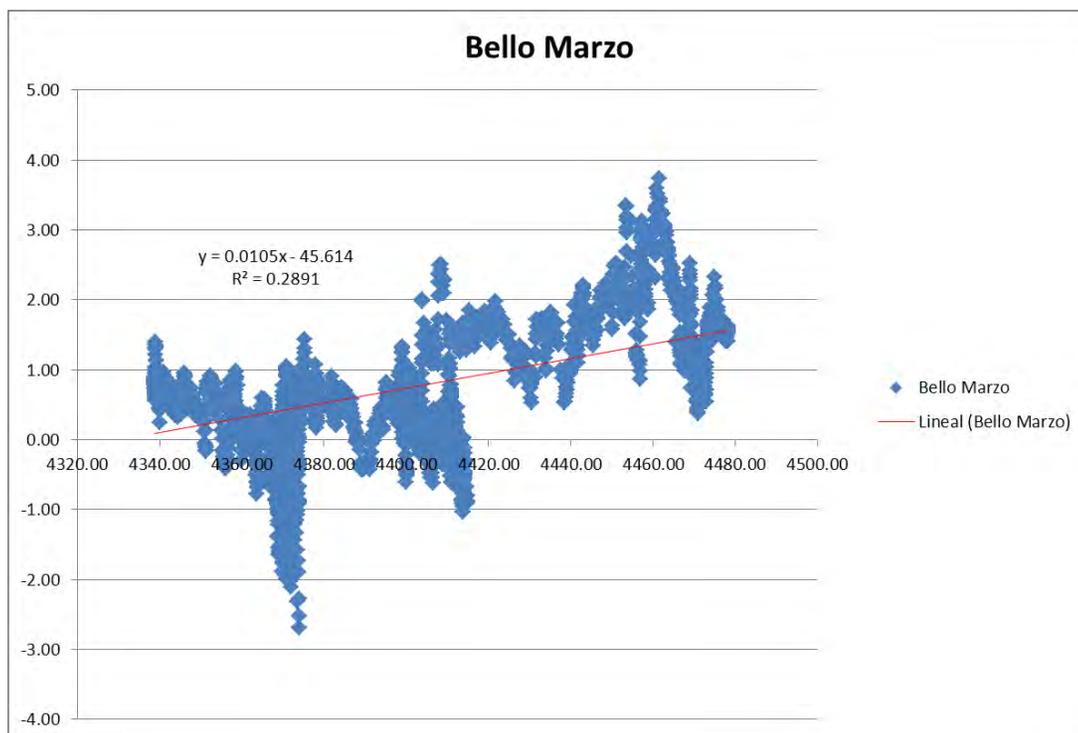


Fig. 2.5.2-I. Correlación de la diferencia de cota (ΔH) (eje de ordenadas) con la cota del levantamiento DGPS de marzo de 2013 (eje de abscisas), glaciar Bello.

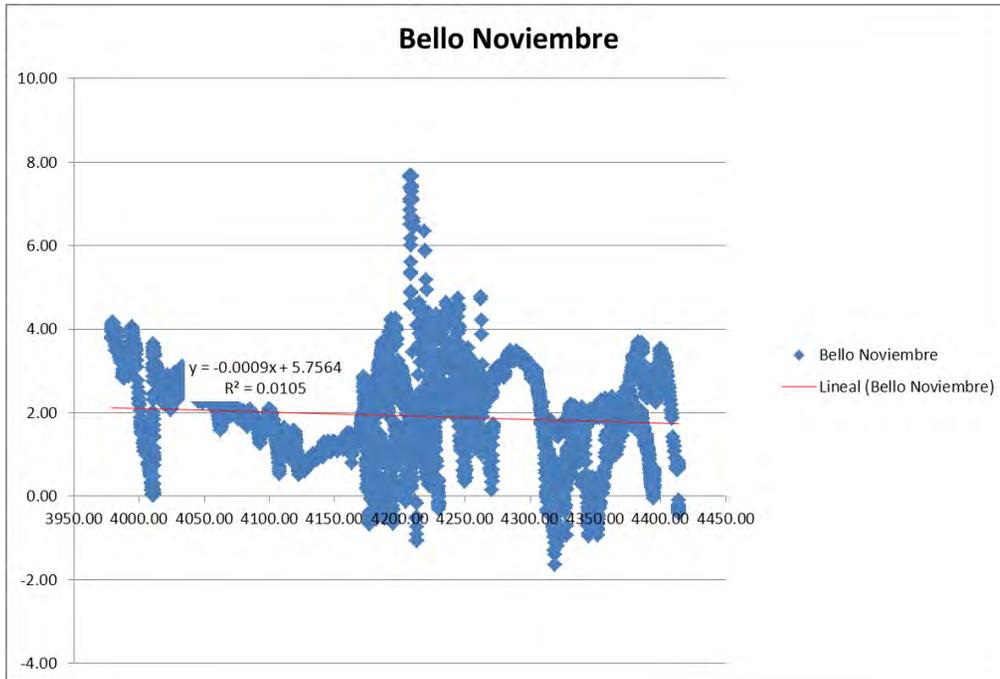


Fig. 2.5.2-J. Correlación diferencia de cota (ΔH) (eje de ordenadas) con la cota del levantamiento DGPS de noviembre de 2013 (eje de abscisas), glaciar Bello.

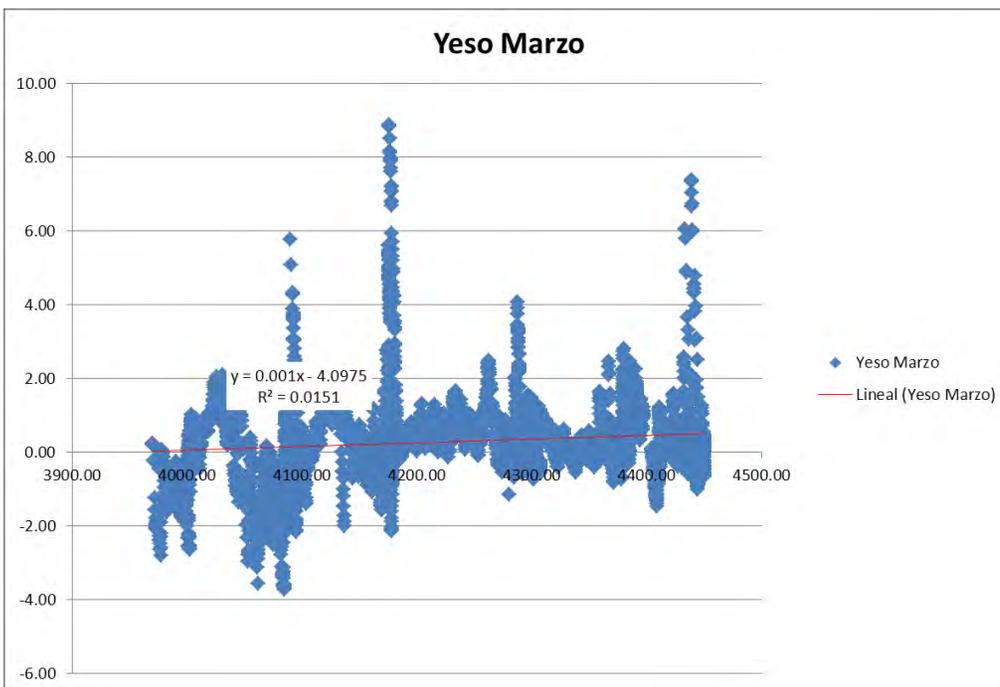


Fig. 2.5.2-K. Correlación diferencia de cota (ΔH) (eje de ordenadas) con la cota del levantamiento DGPS de marzo de 2013 (eje de abscisas), glaciar Yeso.

Debido a ello se optó en el glaciar Bello por calcular el valor medio de ΔH de cada uno de los levantamientos DGPS y extrapolar ese valor a todo el glaciar. En el caso del glaciar Yeso se observó un cierto patrón espacial en el levantamiento DGPS que permitió dividir el glaciar en 3 zonas, una inferior donde existe un mayor adelgazamiento, una intermedia con mayor engrosamiento y una superior donde se pudieron observar zonas con adelgazamiento y zonas con engrosamiento (Fig. 2.5.2-L).

Durante la fecha del vuelo LIDAR (abril 2012) se observa en las Figs. 2.2.3.3-B y C que existía nieve, pero probablemente una capa delgada de no más de 0,5 m (valor estimado) de principios de temporada de acumulación, con una densidad estimada del orden de 0,3 g/cm³. Dado que en el mes de marzo de 2013 se observó en terreno que la superficie de los glaciares donde se instalaron las balizas correspondía a hielo, el cálculo de equivalente en agua masa se realizó con una densidad ponderada igual a 0,85 g/cm³. Para el caso del balance a noviembre de 2013, donde si había nieve, su densidad es probablemente del orden de 0,6 g/cm³ y se optó por aplicar una densidad ponderada del orden de 0,70 g/cm³. En la Tabla 2.5.2-A se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 2.5.2-A. Balance de masa geodésico en los glaciares Bello y Yeso.

Glaciar	Fecha levantamiento DGPS	Área (m²)	ΔH medio (m)	Densidad (g/cm³)	ΔH medio eq.a. m	Volumen eq.a. (m³)
Bello	Marzo 2013	4.219.000	0,67	0,85	0,57	2.402.721
Bello	Noviembre 2013	4.219.000	1,91	0,70	1,34	5.640.803
Yeso	Franja inferior	268.206	0,23	0,85	0,20	52.434
	Franja media	616.119	0,42	0,85	0,36	219.954
	Franja superior	1.148.728	0,38	0,85	0,32	371.039
	Total Yeso					0,34

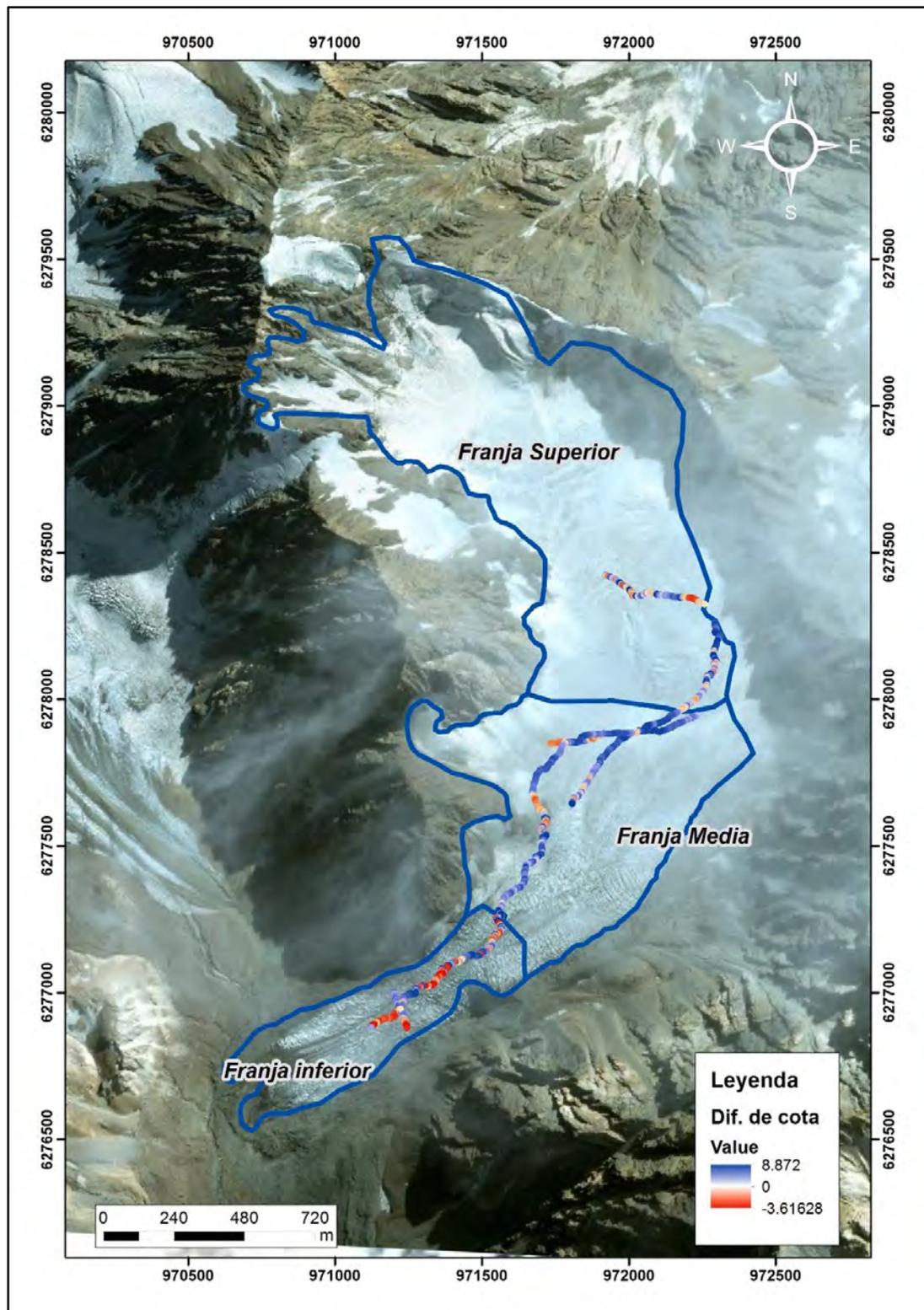


Fig. 2.5.2-L. División del glaciar Yeso en franjas para el cálculo del balance de masa geodésico.

2.5.3. Balance de energía

2.5.3.1. Balance de energía en el glaciar Bello otoño 2013

El balance de energía estimado en el glaciar Bello se realizó en el punto de la estación meteorológica sobre el glaciar, y para el periodo en que se cuenta con los datos necesarios para la estimación de los flujos de energía, esto es entre el 28 de marzo y el 28 de abril de 2013.

Los datos meteorológicos utilizados en el balance de energía del glaciar Bello corresponden a la temperatura del aire, humedad relativa, presión atmosférica, velocidad del viento, radiación de onda corta incidente y reflejada y radiación de onda larga incidente y emitida. Todos registrados a 2 m del suelo y presentados en la sección 2.4. La precipitación utilizada es la registrada en la estación del Río Maipo en San Alfonso que se encuentra en la cuenca del Maipo en las coordenadas UTM 19S 376.639 E y 6.266.811 S. a una altitud de 1108 m s.n.m. La estación Río Maipo en San Alfonso se encuentra aproximadamente a 40 km al suroeste de la estación en el glaciar Bello.

La temperatura promedio en el periodo es de $-1,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ con temperaturas positivas un 37% del tiempo (ver Fig. 2.4.1-A). La humedad relativa es baja la mayor parte del periodo con un promedio igual a 31,6% (ver Fig. 2.4.2-A). La velocidad del viento es relativamente baja para un glaciar con un promedio igual a 3,1 m/s (ver Fig. 2.4.4-A). La presión atmosférica tiene un promedio de 618 mbar (ver Fig. 2.4.3-A). La radiación de onda corta incidente tiene un promedio de 314 W/m^2 , ver Fig. 2.4.6-A donde se observan los días nublados en que la radiación de onda incidente disminuye, estos días fueron el 1, 10, 11, 12 y 26 de abril. La radiación de onda corta reflejada tiene valores fuera de rango ya que presenta valores máximos mayores al valor máximo teórico en la zona y periodo de análisis igual a 1.059 W/m^2 ; para corregir la radiación de onda corta incidente medida se calculó un factor entre los máximos diarios medidos y la radiación de onda corta incidente calculada según (Cuffey y Paterson, 2010) igual 0,66, con el cual se corrigieron los datos de radiación de onda corta incidente y también la reflejada. La radiación de onda corta incidente corregida tiene un promedio de 208 W/m^2 y la radiación de onda corta reflejada corregida tiene un promedio igual a 113 W/m^2 , que da un albedo promedio igual 0,63. Este valor de albedo corresponde a un valor característico para neviza vieja (Cuffey y Paterson, 2010) que coincide con la situación de la superficie del glaciar en el lugar de la estación meteorológica. En La Fig. 2.5.3.1-A se presentan los valores horarios

de albedo que se encuentran en el rango 0.28 y 0.9, donde se observa que el 1 de abril aumenta el albedo debido a la caída de nieve. Las radiaciones de onda larga incidente y emitida son en promedio, 229 W/m² y 289 W/m² respectivamente (ver Fig. 2.4.7-A).

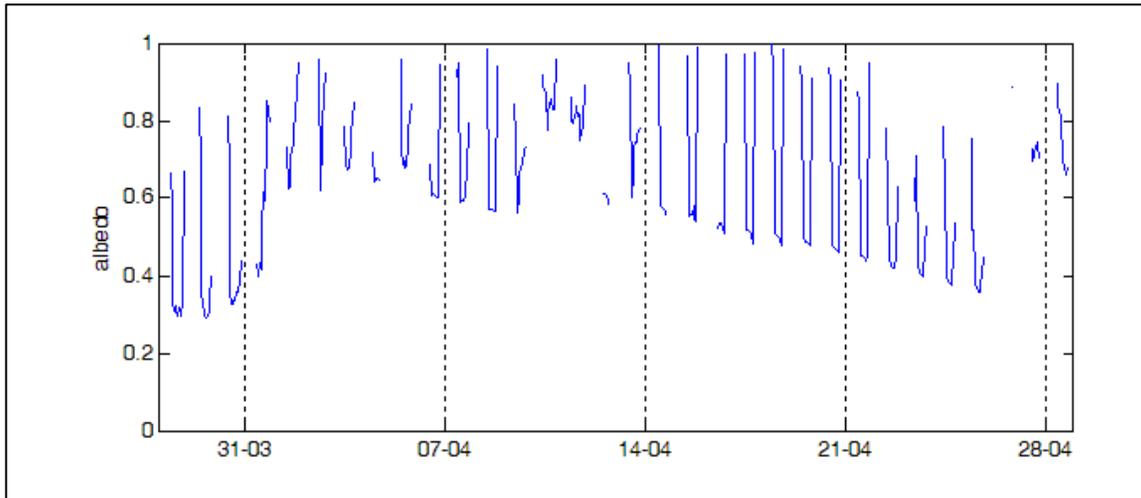


Fig. 2.5.3.1-A. Albedo promedio horario.

Los datos de precipitación horaria en la estación Río Maipo en San Alfonso presentan cero precipitación en el periodo en estudio, sin embargo, del análisis del albedo sabemos que ocurrió precipitación sólida el 1 de abril, por lo que los datos de la estación Río Maipo en San Alfonso no son representativos. Debido a que no se cuenta con datos de precipitación líquida cercanos a la estación Bello en el glaciar, no se calculó el aporte de calor por la precipitación, sin embargo, debido a la temperatura y baja precipitación esperada inferimos que el aporte de calor es despreciable o igual a cero.

La ecuación utilizada para la estimación del balance de energía es la siguiente:

$$Q_M = R_{Snet} + R_{Lnet} + Q_S + Q_L$$

Donde Q_M es la energía disponible para la fusión, R_{Snet} es el balance de la radiación de onda corta, R_{Lnet} es el balance de radiación de onda larga, Q_S es el flujo de calor sensible, y Q_L es el flujo de calor latente.

Esta ecuación corresponde a la ecuación general utilizada en balance de energía en superficie (Oerlemans, 2010 y Brock y Arnold, 2000).

El cálculo de los flujos turbulentos se realizó utilizando el método "bulk". Este método recibe su nombre de la hipótesis que la capa superficial es representada por los valores de humedad específica (q), la temperatura del aire (T_a) y velocidad del viento (v) medidas en un punto. Las ecuaciones utilizadas para calcular los flujos turbulentos con este método se presentan a continuación (Cuffey and Paterson, 2010):

$$Q_s = \frac{\rho * C_p * k^2 * v * (T_a - T_s)}{\ln \frac{z}{z_0} * \ln\left(\frac{z}{z_{0t}}\right)}$$

$$Q_L = \frac{\frac{0.623}{P} * \rho * L_{v/s} * k^2 * v * (e_a - e_s)}{\ln \frac{z}{z_0} * \ln\left(\frac{z}{z_{0m}}\right)}$$

Donde Q_s es el flujo de calor sensible y Q_L el flujo de calor latente, ρ es la densidad del aire (kg/m^3), C_p es el calor específico del aire $1.010 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, P la presión atmosférica, k es la constante de von Karman (0,41). T_a es la temperatura del aire medida a la altura z . T_s es la temperatura en superficial, v es la velocidad del viento, $L_{v/s}$ es el calor específico latente de sublimación igual al calor latente específico de evaporación (2.500 J/g o $400 \text{ cal}/(\text{g} \cdot \text{C})$) más el calor específico de fusión del hielo (334 J/g o $79,7 \text{ cal}/(\text{g} \cdot \text{C})$). e_a es la presión de vapor del aire a la altura z y e_s es la presión de vapor en la superficie (que se supone igual a la saturación). Z_0 corresponde a la altura a la cual según el perfil del viento, la velocidad del viento es igual a cero. Z_{0t} es la altura a la cual la temperatura del aire es igual a la temperatura superficial y Z_{0m} es la altura a donde el momentum es cero.

Para la estimación de los flujos turbulentos se utilizó el parámetro Z_0 igual a $0,0005 \text{ m}$ acorde a lo observado en terreno, valor en el rango de la rugosidad entre hielo y neviza Cuffey y Paterson (2010). Para los parámetros Z_{0m} y Z_{0t} se utiliza la aproximación sugerida por Cuffey y Paterson (2010) donde ambos parámetros se estiman igual a $0.01 * z_0$.

Para el cálculo del calor latente se considera que existe sublimación solo en el caso que la suma de los otros flujos sea positiva y exista energía disponible. En el caso de no existir energía disponible se considera que el flujo de calor latente es cero o podría existir condensación. Una vez que se satisface la sublimación el excedente de energía disponible se utiliza en fusión.

La presión de vapor saturado (e_s) se estima con la ecuación empírica de Bolton (1980) que se presenta a continuación.

$$e_s = 6.112 * EXP \frac{17.67 * T_a}{T_a + 243.5}$$

Donde T_a es la temperatura del aire en °C y e_s esta expresada en hPa, mientras que EXP es la función exponencial.

La densidad del aire se calcula con la siguiente fórmula:

$$\rho = \frac{P_{a.seco}}{K_{as} * T_a} + \frac{P_{vap.agua}}{K_{va} * T_a}$$

Donde ρ es la densidad del aire, $P_{a.seco}$ es la presión del aire seco, K_{as} es la constante de los gases para el aire seco 287,050 J/(kg°K). T_a es la temperatura del aire, $P_{vap.agua}$ es la presión del vapor de agua y K_{va} es la constante de los gases para el vapor de agua 461.495 J/(kg°K).

La presión del vapor se calcula como sigue:

$$e = e_s * HR$$

Donde e_s es la presión de vapor saturado y HR es la humedad relativa.

Los resultados del balance muestran que la principal entrada de energía en el periodo estudiado (28 de marzo a 28 de abril de 2013) es la radiación de onda corta neta (R_{Snet}) que corresponde a un 100% de la entrada total de energía como promedio en el periodo, ver Tabla 2.5.3.1-A. El flujo calor sensible (Q_s) es en promedio negativo y representa un 7% de la energía entrante, esto se debe a que la temperatura del aire es principalmente

negativa y por bajo la temperatura de la superficie, que se asume igual a 0 °C ya que se encuentra en fusión. La pérdida de energía por radiación de onda larga es igual a un 63% de la energía entrante, bastante alta debido a que la mayoría de los días el cielo se encontraba despejado (ver Fig. 2.5.3.1-B). La pérdida de energía por el flujo de calor latente (Q_L) es un 19% de la energía entrante y un 63 % de la energía disponible para la ablación. Esto se debe a que la humedad relativa es baja (promedio en el periodo igual a 31,6%) y por lo tanto la diferencia entre la presión de vapor (promedio 155 Pa) y la presión de vapor saturado (promedio 556 Pa) es alta. La energía disponible para la fusión que corresponde al total del balance es positiva el 32% del tiempo, solo durante las horas de mayor radiación y sigue un ciclo diario muy similar a la radiación solar incidente que corresponde al principal aporte de energía (ver Fig. 2.5.3.1-C). Cuando la energía disponible es menor a cero significa que la superficie se está enfriando y está enfriando las capas inferiores, sin embargo durante las horas con radiación la superficie vuelve al punto de fusión.

En la Tabla 2.5.3.1-A se presenta el promedio de los flujos de energía estimados en el periodo 28 de marzo a 28 de abril de 2013 y en la Fig. 2.5.3.1-C se presentan los flujos de energía promedios horarios.

Tabla 2.5.3.1-A Flujos de energía promedio, periodo 28 de marzo a 28 de abril de 2013.

Q_M	R_{snet}	R_{inet}	Q_L	Q_s
(W/m ²)				
10,7	94,8	-59,3	-17,9	-7,0

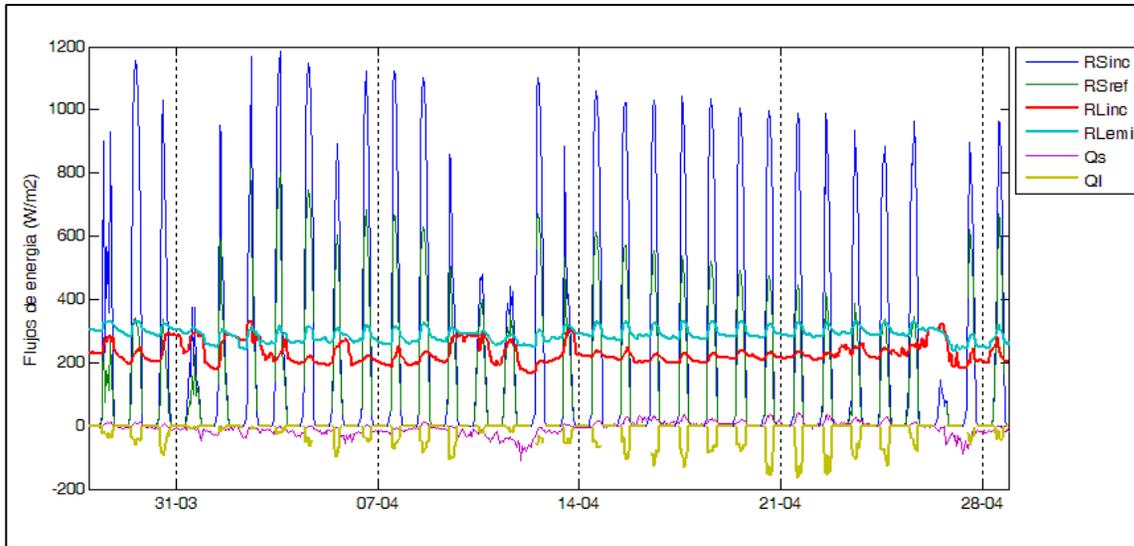


Fig. 2.5.3.1-B. Flujos de energía promedio horario.

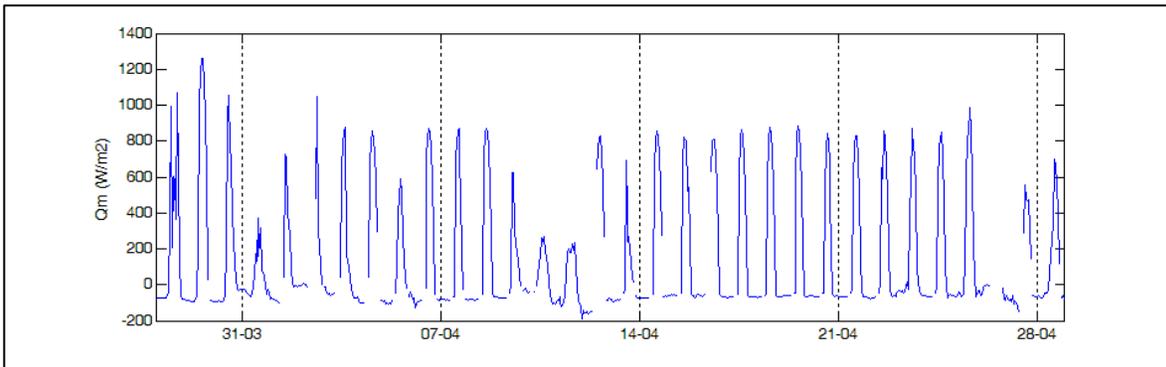


Fig. 2.5.3.1-C. Energía disponible para la fusión promedio horario.

Con los flujos de calor latente y energía disponible para la fusión se calcula la ablación en el periodo. Para la sublimación (S), calculada en m eq.a. se utiliza la siguiente formula:

$$S = \frac{Q_L * t}{C_S * \rho}$$

Donde Q_L es el flujo de calor latente estimado (W/m^2), t es el periodo de tiempo para el cual se quiere calcular la sublimación en segundos, C_S es el calor específico de sublimación del hielo $2.834 J/gr$ y ρ es la densidad promedio de la capa en $gr/cm^3/10^4$.

El cálculo de la fusión (f) en m eq.a. se realiza mediante la siguiente fórmula:

$$f = \frac{Q_M * t}{C_f * \rho}$$

Donde Q_M es la energía disponible para la fusión (W/m^2), t es el periodo de tiempo para el cual se quiere calcular la fusión en segundos. C_f el calor específico de fusión del hielo 334 J/gr y ρ la densidad promedio de la capa en $gr/cm^3/10^4$.

La densidad se estimó igual a 0,7 gr/cm^3 que corresponde al valor de la densidad entre neviza y hielo (Cuffey y Paterson. 2010).

La ablación total estimada en el periodo es de 12,3 cm eq.a., de los cuales 2,0 cm eq.a. son de sublimación y 10,3 cm eq.a. de fusión. Se debe tener en cuenta que el balance energético no fue validado ya que no se cuenta con datos de altura de nieve o ablación, por lo que sus resultados se deben considerar con precaución.

La tasa de ablación promedio estimada en este estudio es igual a 0,4 cm eq.a./día. La ablación estimada con el balance de energía es similar a la medida en las balizas de ablación cuyo promedio es 0,2 cm/día en el periodo de análisis. La diferencia puede deberse a la caída de nieve que produjo una subestimación de la ablación medida con las balizas.

2.5.3.2. ***Balance de energía en el glaciar Bello y Yeso primavera 2013***

El balance de energía estimado en primavera del 2013 en el glaciar Bello y Yeso corresponde al periodo entre el 16 y el 30 noviembre del 2013. Estos datos se recuperaron de las estaciones instaladas con transmisión satelital el 15 de noviembre del 2013. La ubicación de las estaciones se presenta en la Tabla 2.5.3.2-A.

Tabla 2.5.3.2-A. Estaciones meteorológicas instaladas en primavera 2013, en glaciares Bello y Yeso.

Estación	Tipo	Este (m)	Norte (m)	Cota (m)
Yeso	GEUS	414.554	6.289.714	4.428
Bello	GEUS	412.744	6.289.113	4.134

Los datos meteorológicos utilizados en el balance de energía del glaciar Bello y Yeso en primavera corresponden a la temperatura del aire del sensor aspirado, humedad relativa, presión atmosférica, velocidad del viento, radiación de onda corta incidente y reflejada y radiación de onda larga incidente y emitida. Todos registrados a 2 m del suelo.

La temperatura promedio del aire en el glaciar Bello es de $-1,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ y del Yeso $-4,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, la temperatura promedio horaria se muestra en la Fig. 2.5.3.2-A donde se observa que la temperatura es principalmente negativa. La humedad relativa promedio en el glaciar Bello es $36,7\%$ y en el Yeso $40,3\%$. En la Fig. 2.5.3.2-B se presentan las humedades relativas promedio horarias en ambos glaciares. La velocidad del viento promedio medida en el glaciar Bello es igual a $3,4\text{ m/s}$ y en el Yeso $2,8\text{ m/s}$, valores de velocidad moderados para un glaciar de montaña. En la Fig. 2.5.3.2-C se presentan las velocidades promedio horarias medidas en los dos glaciares. La radiación de onda corta incidente promedio en el glaciar Bello es igual a 358 W/m^2 y en el Yeso es 359 W/m^2 . La radiación de onda corta reflejada promedio es de 197 W/m^2 en el glaciar Bello y de 204 W/m^2 en el glaciar Yeso. Los datos promedio horarios de radiación de onda corta incidente se presentan en la Fig. 2.5.3.2-D y E. Se observa que la radiación incidente presenta valores máximos diarios muy altos por sobre radiación solar extraterrestre igual a 1.367 W/m^2 . Estos altos valores de radiación pueden ser explicados debido al reflejo de la radiación solar en las laderas que bordean los glaciares que pueden provocar un aumento de la radiación difusa de hasta 150 W/m^2 (Corripio, 2005). El albedo promedio en las horas de sol en el glaciar Bello es $0,59$ y en el Yeso es de $0,60$, valores característicos de la nieve al inicio de la temporada de ablación, nieve no tan nueva y humedad (Caffey y Paterson, 2010). En la Fig. 2.5.3.2-F se presentan los valores de albedo horario donde se observa que el albedo aumenta al inicio y final del día debido a la inclinación del sol y que los mínimos diarios van disminuyendo al avanzar la temporada de ablación. La radiación de onda larga incidente promedio en el glaciar Bello es igual a 218 W/m^2 y en el Yeso es 211 W/m^2 , la radiación de onda larga emitida promedio en el glaciar Bello es 295 W/m^2 y en el Yeso

289 W/m². Los valores promedio horarios de radiación de onda larga se presentan en las Fig. 2.5.3.2-G y H, donde se observa una diferencia casi constante entre la radiación de onda larga incidente y emitida en ambos glaciares, excepto en los días con nubosidad que son escasos.

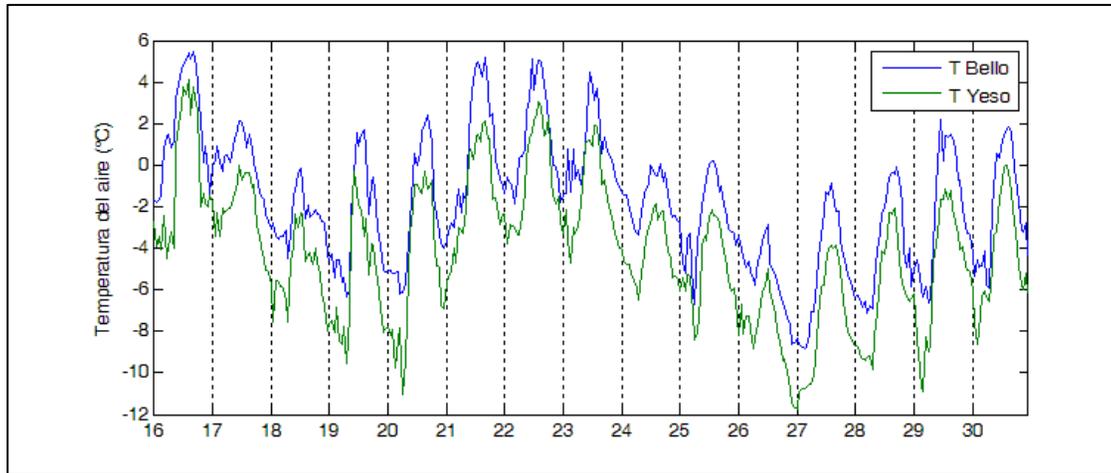


Fig. 2.5.3.2-A. Temperatura promedio horaria medida en la estación en el glaciar Bello y Yeso en noviembre 2013.

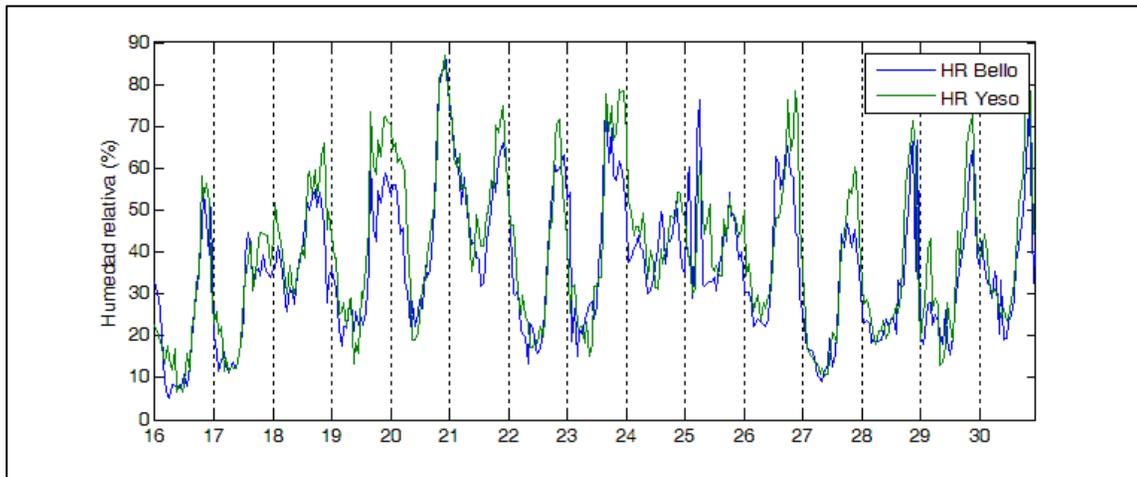


Fig. 2.5.3.2-B. Humedad relativa promedio horaria medida en la estación en el glaciar Bello y Yeso en noviembre 2013.

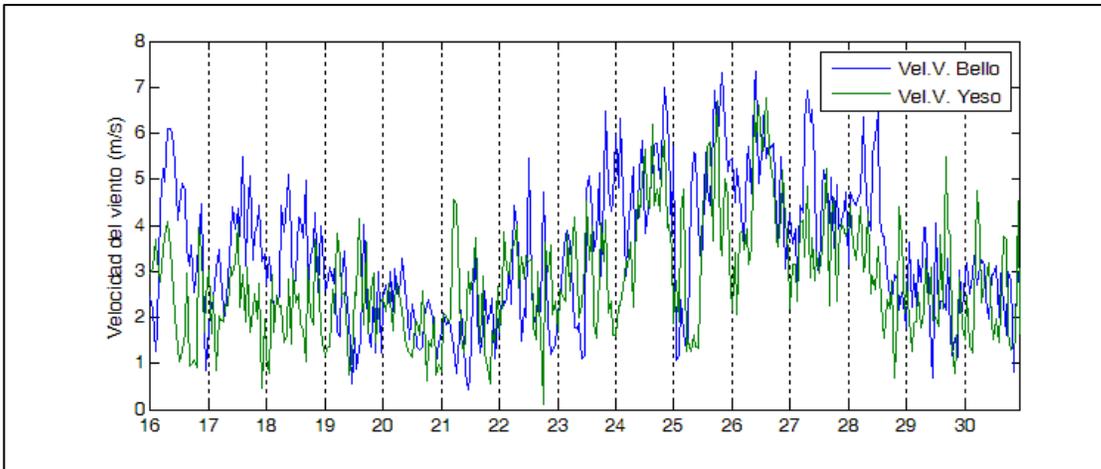


Fig. 2.5.3.2-C. Velocidad del viento promedio horaria medida en la estación en el glaciar Bello y Yeso en noviembre 2013.

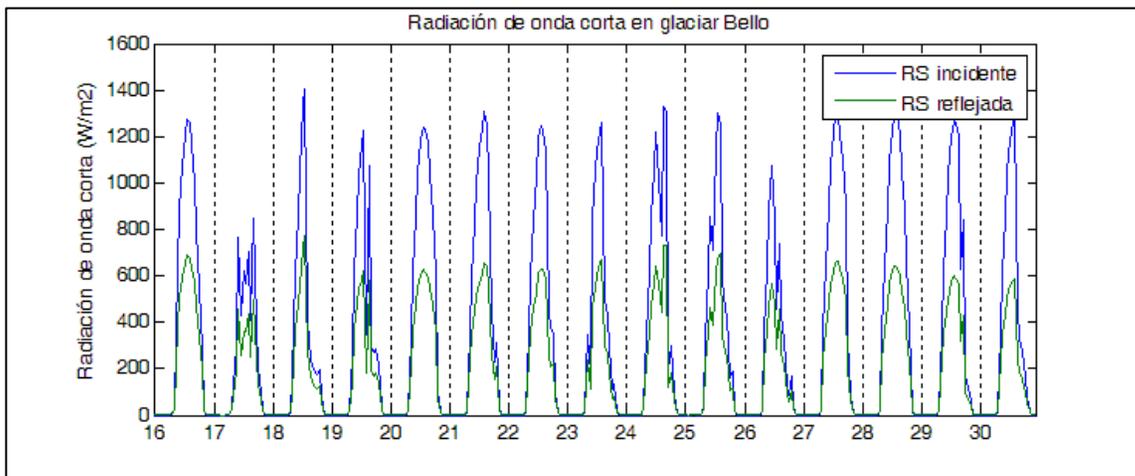


Fig. 2.5.3.2-D. Radiación de onda corta incidente y reflejada promedio horaria medida en la estación en el glaciar Bello en noviembre 2013.

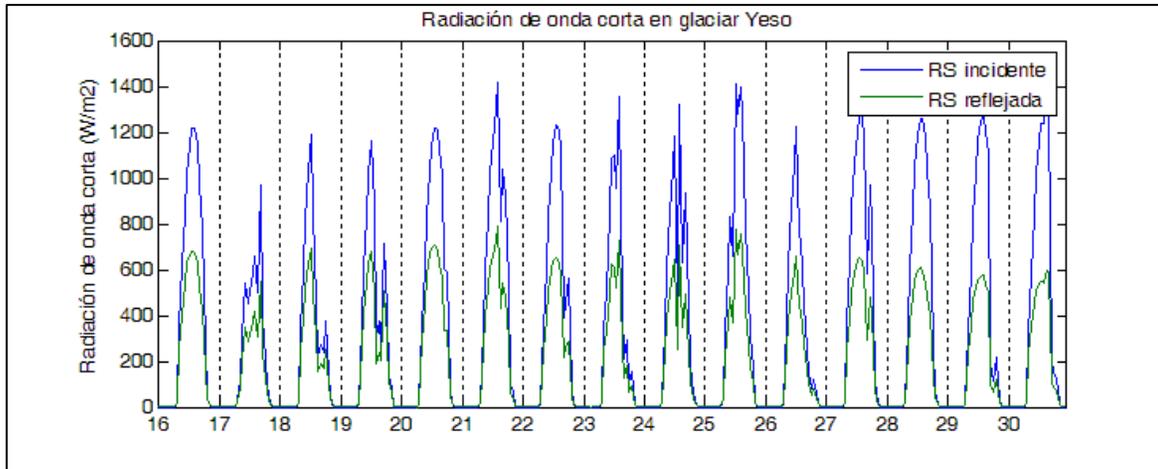


Fig. 2.5.3.2-E. Radiación de onda corta incidente y reflejada promedio horaria medida en la estación en el glaciar Yeso en noviembre 2013.

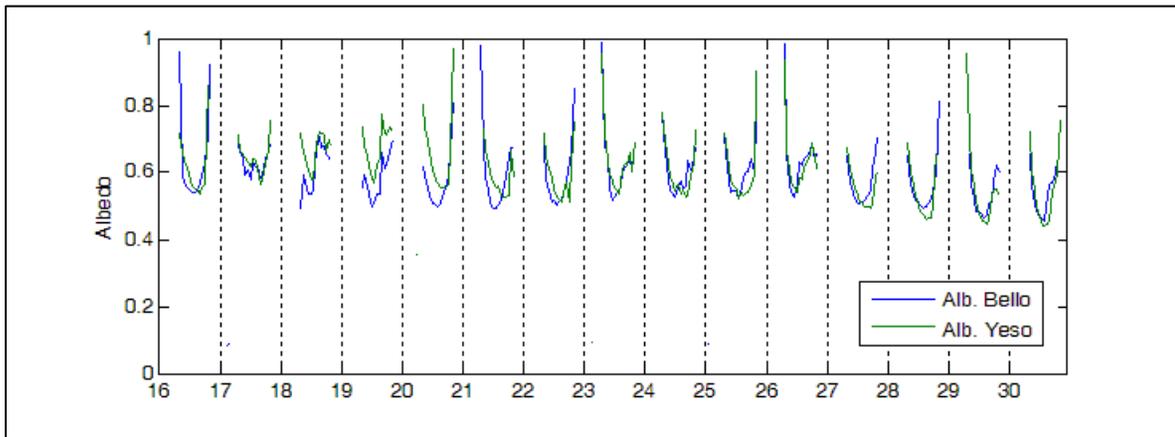


Fig. 2.5.3.2-F. Albedo promedio horario medida en la estación en el glaciar Bello y Yeso en noviembre 2013.

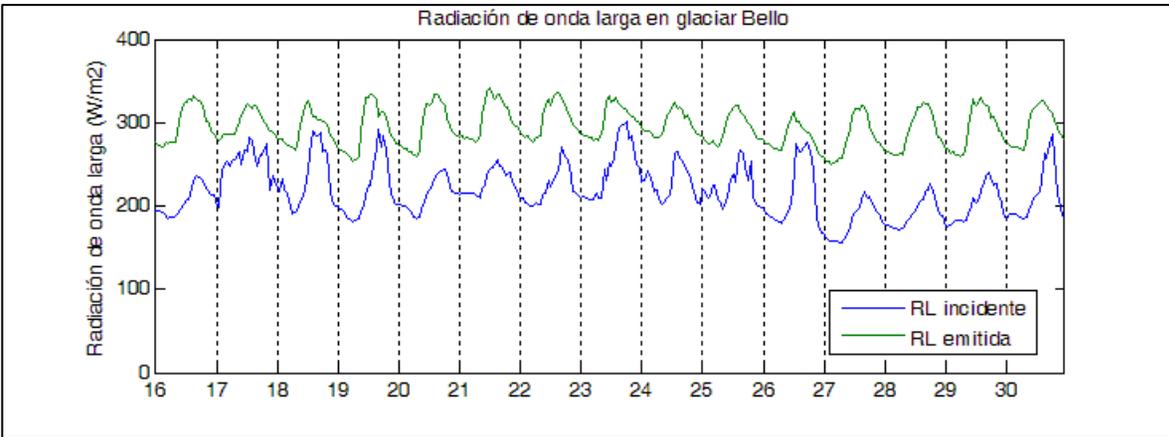


Fig. 2.5.3.2-G. Radiación de onda larga incidente y emitida promedio horaria medida en la estación en el glaciar Bello en noviembre 2013.

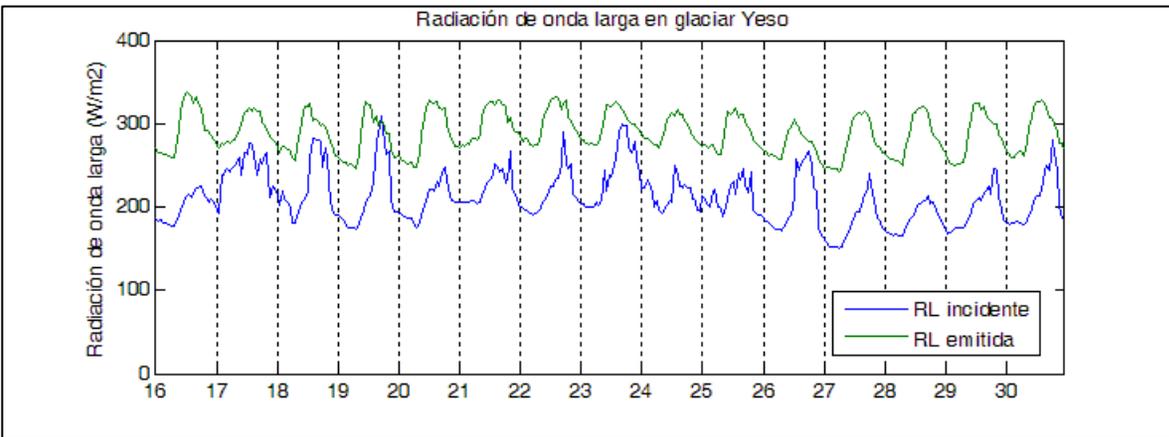


Fig. 2.5.3.2-H. Radiación de onda larga incidente y emitida promedio horaria medida en la estación en el glaciar Yeso en noviembre 2013.

La precipitación utilizada, al igual que para el balance de energía en el glaciar Bello en otoño, es la registrada en la estación del Río Maipo en San Alfonso. Esta estación presenta cero precipitación en el periodo de estudio en primavera y debido a que no se cuenta con datos de precipitación líquida cercanos a la estación Yeso en el glaciar, no se calculó el aporte de calor por la precipitación, sin embargo, debido a la temperatura y baja precipitación esperada inferimos que el aporte de calor es despreciable o igual a cero.

La metodología utilizada para la estimación del balance de energía es igual a la utilizada en el balance de energía realizado en el glaciar Bello en otoño, explicada en el punto 2.5.3.1.

Para la estimación de los flujos turbulentos se utilizó el parámetro Z_0 igual a 0,0001 m según la observación en terreno, valor en el rango de la rugosidad de nieve-neviza Cuffey y Paterson (2010). Para los parámetros z_{om} y z_{ot} se utiliza la aproximación sugerida por Cuffey y Paterson (2010) donde ambos parámetros se estiman igual a $0,01 * z_0$.

Los resultados del balance muestran que la principal entrada de energía en el periodo estudiado (16 y 30 de noviembre del 2013) es la radiación de onda corta neta (R_{Snet}) en ambos glaciares (Bello y Yeso) que corresponde a un casi 100% de la entrada total de energía como promedio en el periodo, ver Tabla 2.5.3-A. El flujo calor sensible (Q_s) es en promedio negativo y representa un 5% de la energía entrante en el glaciar Bello y un 10% en el glaciar Yeso. Esto se debe a que la temperatura del aire es principalmente negativa y por debajo de la temperatura de la superficie, que se asume igual a 0 °C ya que se encuentra en fusión. La pérdida de energía por radiación de onda larga es igual a un 48% de la energía entrante en el glaciar Bello y un 50% en el glaciar Yeso, bastante alta debido a que la mayoría de los días el cielo se encontraba despejado (ver Fig. 2.5.3.2-G e H). La pérdida de energía por el flujo de calor latente (Q_L) es un 14% de la energía entrante en el glaciar Bello y un 10% en el glaciar Yeso. Esto se debe a que la humedad relativa es relativamente baja en los dos glaciares y por lo tanto la diferencia entre la presión de vapor (promedio 199 Pa y 182 Pa en glaciar Bello y Yeso respectivamente) y la presión de vapor saturado (promedio 553 Pa y 463 Pa en glaciar Bello y Yeso respectivamente) es alta.

En las Fig. 2.5.3.2-I y J se presentan los flujos de energía promedio horario estimados, la energía disponible promedio horaria y la ablación promedio horaria estimada y medida en la estación en los dos glaciares en estudios. Para estimar la ablación se utilizó la misma metodología explicada en el punto 2.5.3.1.

La energía disponible para la fusión que corresponde al total del balance es positiva solo durante las horas de mayor radiación y sigue un ciclo diario muy similar a la radiación solar incidente que corresponde al principal aporte de energía (ver Fig. 2.5.3.2-I y J). Cuando la energía disponible es menor a cero significa que la superficie se está enfriando

y está enfriando las capas inferiores, sin embargo durante las horas con radiación la superficie comienza a calentarse y luego vuelve al punto de fusión.

La comparación entre la ablación estimada con el balance y la ablación medida en el glaciar Bello muestra una tendencia si bien similar que presenta mayores diferencias entre los días 21-24 de noviembre, donde la ablación medida es mayor a la estimada. En estos días se presentaron mayores valores de temperatura del aire (Fig. 2.5.3.2-A) por lo que se infiere que la diferencia entre la ablación estimada y medida puede deberse a una subestimación del calor sensible positivo pero muy pequeño durante estos días. La estimación de los flujos turbulentos requiere un estudio más detallado de las variables y parámetros que influyen en este tipo de flujos como es el análisis del perfil de temperatura y velocidad del viento y la caracterización del parámetro Z_0 , entre otros.

Los datos de ablación en el glaciar Yeso Fig. 2.5.3.2-J (c) muestran que las mediciones tienen un alto rango de variación por sobre el error esperado de ± 1 cm o 4% en el sensor SR50A. Esta variación puede ser producto de la medición del poste del marco en el cual está instalado el sensor o la medición de la punta de un penitente formado en el área de medición que con la vibración del sensor por el viento podría provocar esta variación en la distancia. De existir penitentes en la zona la estimación de los flujos turbulentos se modificaría, debido al cambio en los perfiles logarítmicos de la temperatura y velocidad del viento así como en el parámetro Z_0 . Sin embargo inferimos que la creación de penitentes es muy poco probable ya que la superficie se encontraba bastante plana el 15 de noviembre cuando se instalaron las estaciones y la creación de penitentes en 15 días es muy rápida solo podrían esperarse micro penitentes de no más de algunos centímetros. Finalmente, suponemos que un valor medio de las mediciones podría representar el valor más cercano a la realidad de la ablación en el lugar. Si comparamos la ablación estimada con el balance de energía y la ablación promedio que suponemos ocurrió se observa bastante congruencia entre las dos curvas, sin embargo este resultado es solo referencial debido a la magnitud de los errores medidos.

La estimación de la fusión, sublimación y ablación en todo el periodo, (Tabla 2.5.3.2-C) muestra que la sublimación es mucho menor a la fusión del orden de un 4% de la fusión en el glaciar Bello y un 6% de la fusión en el glaciar Yeso. Esto debido a la menor magnitud del calor latente en comparación a la energía disponible para la fusión y a la mayor energía necesaria para la fusión.

Tabla 2.5.3.2-B. Flujos promedio de energía.

Glaciar	Q_M	R_{snet}	R_{inet}	Q_L	Q_S
	(W/m ²)				
Bello	53,04	160,9	-76,57	-22,76	-8,54
Yeso	47,38	154,3	-77,09	-14,75	-15,07

Tabla 2.5.3.2-C. Ablación, sublimación y fusión.

Glaciar	Sublimación		Fusión		Ablación	
	cm/periodo	cm/día	cm/periodo	cm/día	cm/periodo	cm/día
Bello	1,12	0,04	30,64	0,99	31,77	1,02
Yeso	1,73	0,06	34,30	1,11	36,04	1,16

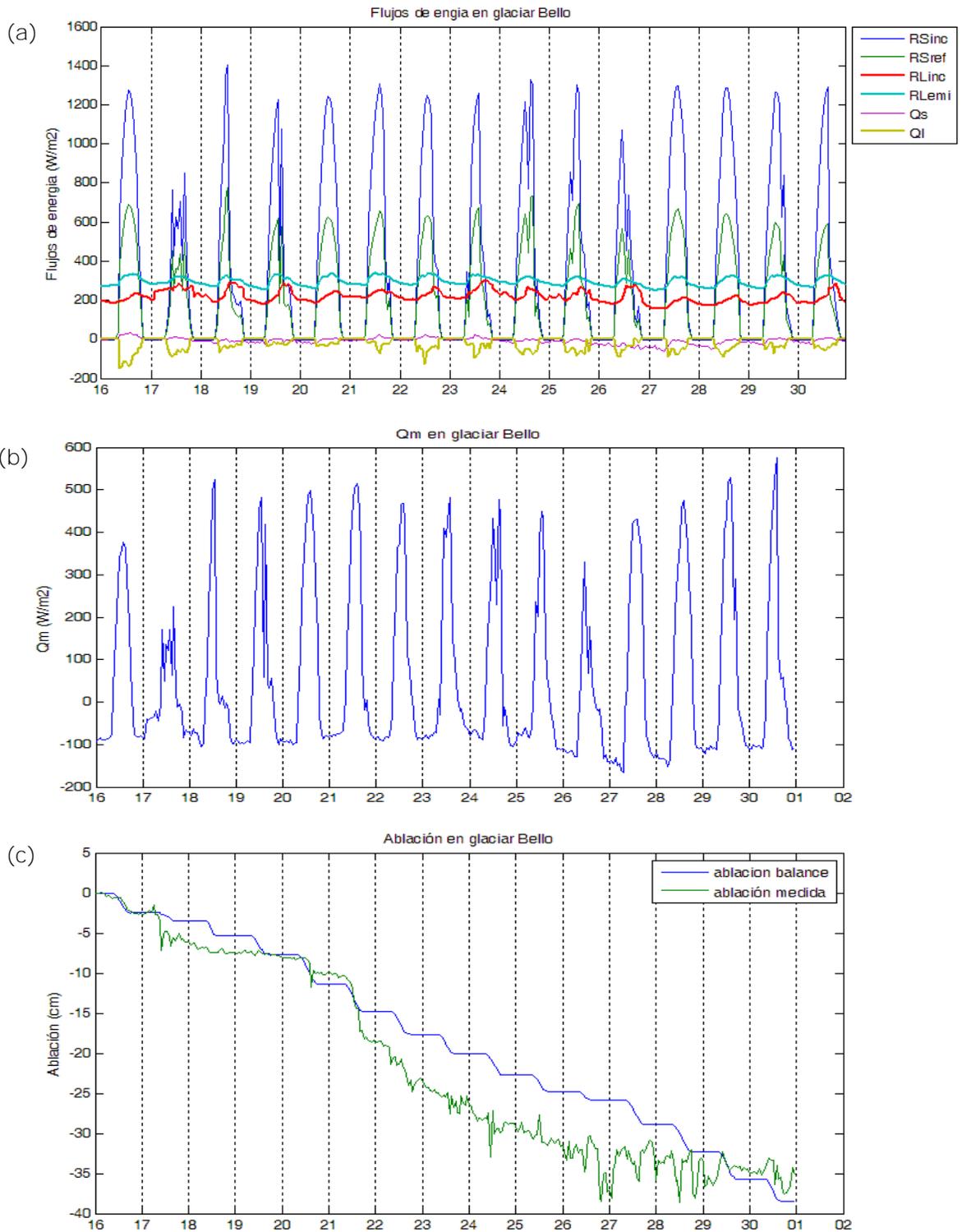


Fig. 2.5.3.2-I. (a) Flujos de energía promedio diarios en el glaciar Bello, (b) la energía disponible para la fusión en el glaciar Bello y (c) la ablación horaria estimada con el balance de energía y medida en la estación meteorológica en el glaciar Bello.

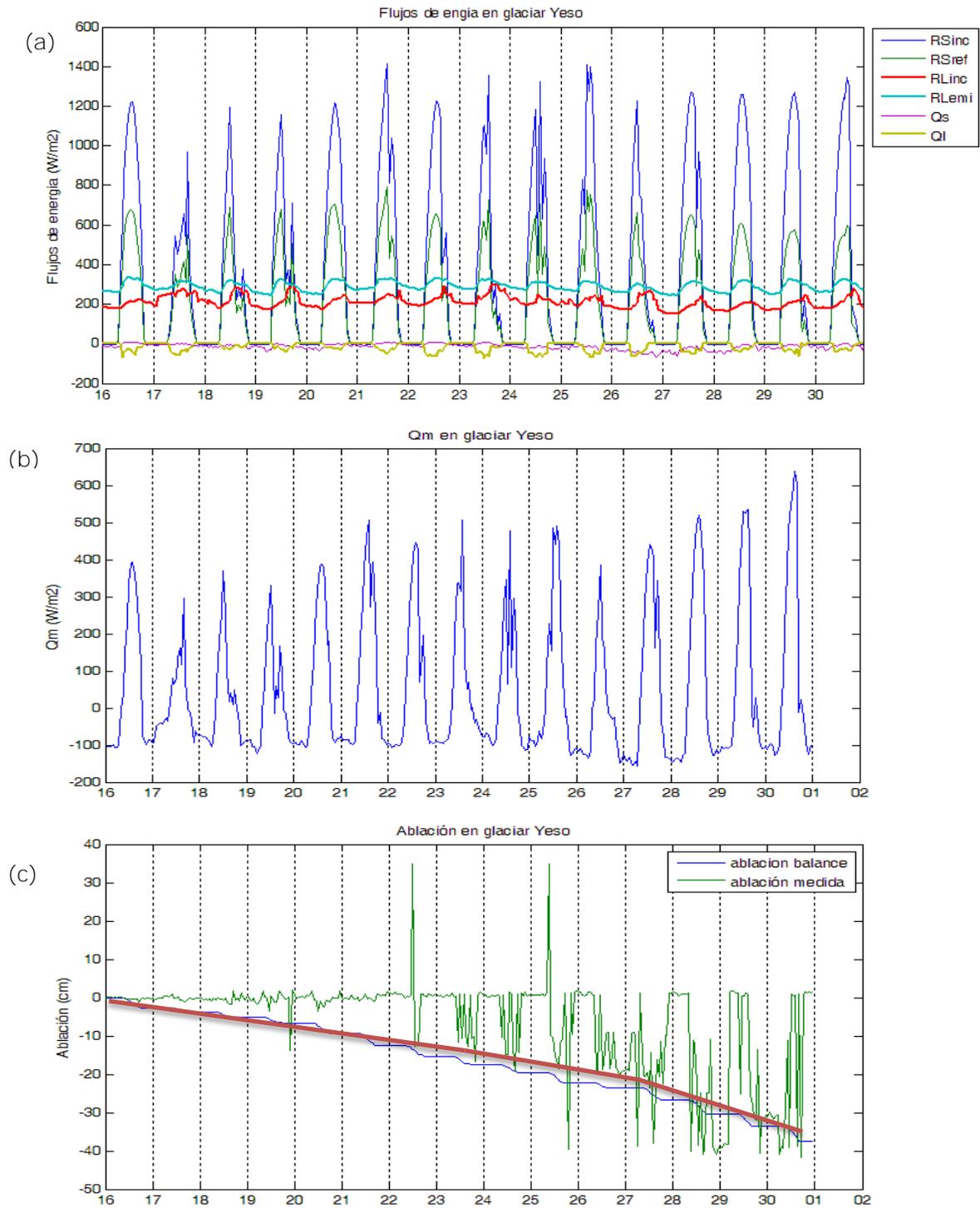


Fig. 2.5.3.2-J. (a) Flujos de energía promedio diarios en el glaciar Yeso, (b) la energía disponible para la fusión en el glaciar Yeso y (c) la ablación horaria estimada con el balance de energía y medida en la estación meteorológica en el glaciar Yeso, la línea roja representa el valor estimado de la ablación promedio medida sin errores.

3. ZONA GLACIOLÓGICA SUR A

3.1. INTRODUCCIÓN

La zona glaciológica Sur A corresponde a la zona comprendida entre las cuencas de los ríos Bío-Bío y Bueno. En esta zona se ha escogido el glaciar sur-oriental del volcán Mocho-Choshuenco, **que llamaremos simplemente glaciar "Mocho", el cual drena al río Blanco, lago Maihue, río Calcurrupe, lago Ranco y finalmente al río Bueno** (Fig. 3.1-A). El balance de masa del glaciar Mocho ha sido monitoreado con el método del balance de masa glaciológico (balizas, pozos estratigráficos y densidades con muestreador Monte Rosa) en forma regular desde mayo de 2003, primero por el Centro de Estudios Científicos (Rivera et al., 2005; Bown et al., 2007), y desde mediados de 2012 con el patrocinio de la Fundación Huilo-Huilo. La serie de datos permite calcular el balance de masa estacional y anual para el periodo 2003-2012, excepto por los años hidrológicos 2006/2007, 2007/2008 y el invierno de 2008 cuando los monitoreos fueron menos frecuentes. Personal de Geoestudios (Gino Casassa, José Luis Rodríguez y Antonio Vásquez) ha participado activamente en dicho monitoreo desde el comienzo.

El glaciar Mocho tiene un área de 5,1 km² (año 2003, Rivera et al., 2005), cubriendo del orden del 30% de todo el hielo del complejo Mocho-Chosuenco (16,9 km² el año 2003, Rivera et al., 2005). Existe una red de 14 balizas en el glaciar que cubren en forma representativa las variaciones espaciales de ablación y acumulación, desde un punto a cota 2400 m s.n.m., bajo la cumbre (2422 m s.n.m.), hasta el sector inferior del glaciar (cota 1720 m s.n.m.). Si bien es cierto el área de hielo del complejo volcánico Mocho-Choshuenco se ha reducido del orden del 40% en el periodo 1976-2003 (de 28,4 km² a 16,9 km², Rivera et al., 2005) (Fig. 3.1-A), el glaciar no muestra adelgazamiento significativo en el periodo 1961-2004 (Rivera et al., 2006), y la serie de balance de masa muestra un valor promedio cercano a cero en el periodo 2003-2012, con años de balance positivo, años de balance cercano a cero y algunos años con balance negativo, dependiendo de las condiciones climáticas interanuales, esencialmente la precipitación invernal y la ablación estival (Rodríguez et al., 2010).

El complejo Mocho-Chosuenco es volcánicamente activo, y su última erupción ocurrió en 1864 (González-Ferrán, 1995; Echegaray, 2004), aunque no presenta actualmente actividad fumarólica. Su actividad histórica y prehistórica, unido a su ubicación en la

vecindad de la falla Liquiñe-Ofqui lo transforma en un volcán con alto peligro potencial de lahares, flujos de lava y piroclásticos (Naranjo et al., 2001).

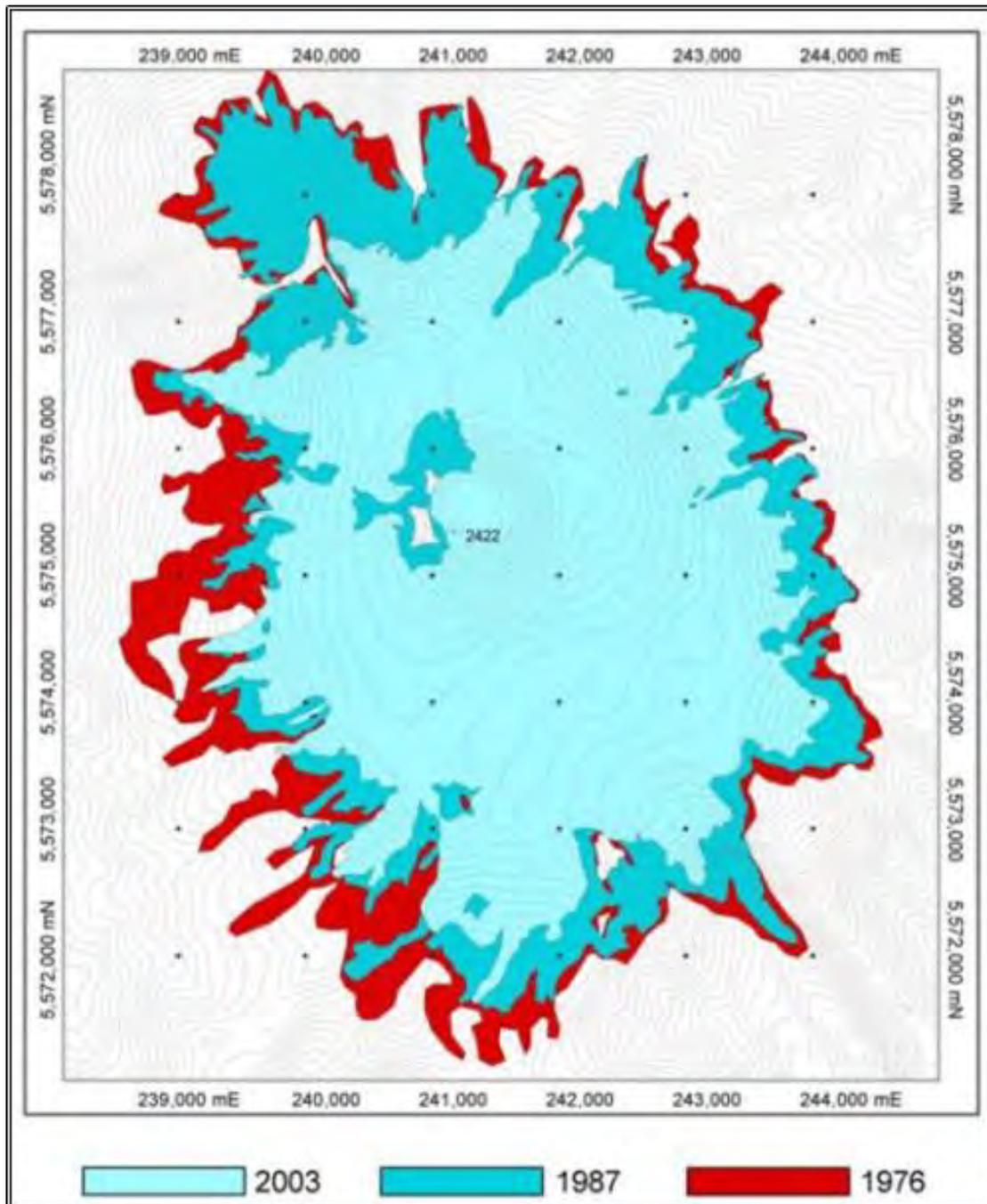


Fig. 3.1-A. Variaciones de área del glaciar en el Volcán Mocho – Choshuenco (Rivera et al., 2005).

Una ventaja de escoger el glaciar Mocho es que ya existe un programa activo de monitoreo glaciológico desde hace 10 años, con una extensa experiencia técnica y logística, y un acceso privilegiado a través de la Reserva Huilo Huilo que incluye un camino para vehículos 4x4 que en verano conduce al pie mismo del glaciar. En el glaciar mismo se puede usar tanto en verano como en invierno vehículos para nieve de propiedad de Huilo Huilo (tractor pisa-nieve y motos de nieve) y de Geostudios (motos de nieve). Previo a este proyecto existían 2 estaciones meteorológicas básicas en el volcán Mocho, instaladas como parte del programa de monitoreo, una ubicada en un nunatak de roca (AWS-1 en la Fig. 3.1-B, cota 1995 m s.n.m.) y otra con sensores básicos en una roca fuera del glaciar (AWS-2 en la Fig. 3.1-B, a cota 1420 m s.n.m.), y una estación hidrológica aguas abajo de uno de los cauces efluentes del glaciar Mocho, a cota 1340 m s.n.m. (River Gauge Station en la Fig. 3.1-B).

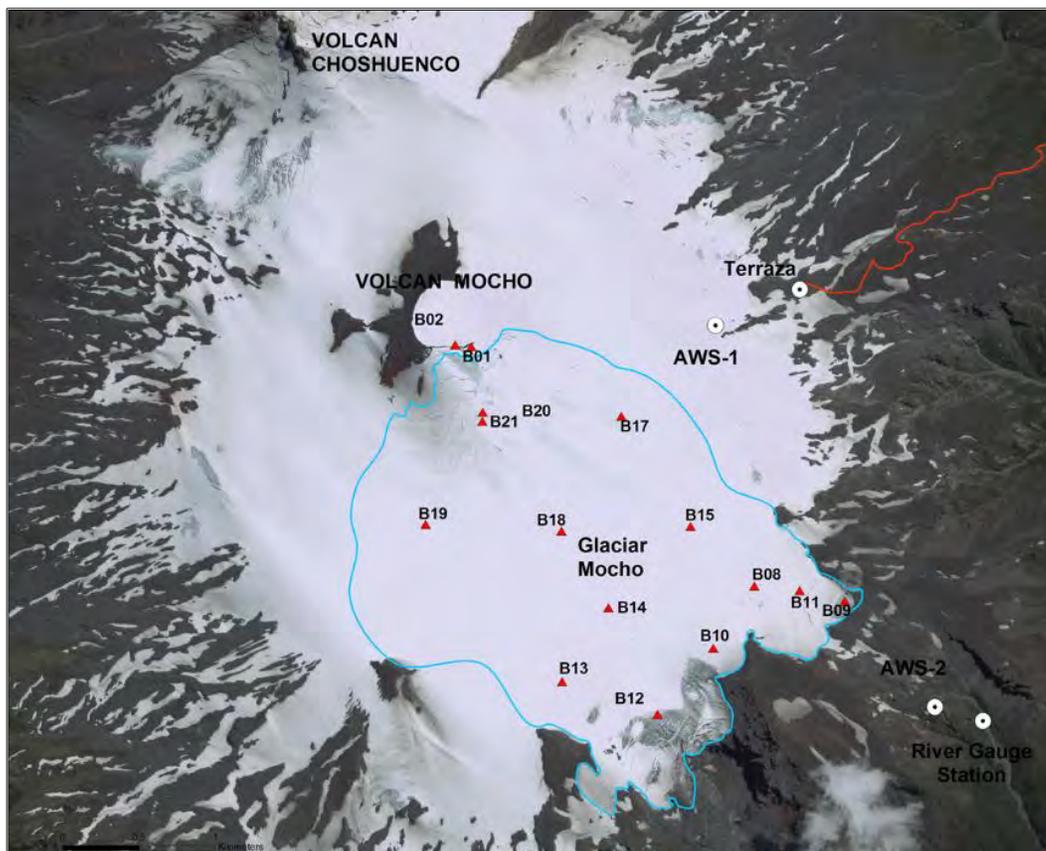


Fig. 3.1-B. Cuenca del glaciar Mocho en azul, volcán Mocho-Choshuenco, zona glaciológica Sur A. B01 a B21 indican la ubicación existente de las balizas. Fuente de la imagen: Google Earth.

La experiencia demuestra que la distribución de las balizas es adecuada, solamente faltaba una baliza en el sector cumbre dentro de la cuenca de estudio. Dicha baliza se instaló en el verano 2011/2012, con el nombre de B3.

La acumulación invernal habitual de nieve sobre el glaciar alcanza al final del invierno una capa de 5 a 10 metros de nieve dependiendo del lugar (con una densidad de nieve promedio cercana a $0,5 \text{ g/cm}^3$), mientras que en el verano la ablación máxima ocurre en B9 (la baliza a menor cota), con valores hasta 7 m equivalente en agua (eq.a.), y la ablación mínima en verano puede ser cercana a 1 m eq.a. en las balizas del sector de la cumbre.

3.2. ACTIVIDADES DE TERRENO

Se efectuaron diversas campañas al volcán Mocho-Choshuenco durante todo el periodo del estudio. Mensualmente para controlar las balizas instaladas sobre el hielo, al principio del contrato, para implementar y controlar una estación fluviométrica, en una ocasión se recorrió el área alrededor del volcán para el estudio de Lahares, luego se efectuó un reconocimiento en conjunto con personal de la Unidad de Glaciología y Nieves (UGN) de la DGA para definir el lugar donde se instalaría la estructura para una estación meteorológica, y en noviembre nuevamente para controlar y mantener la estación fluviométrica, efectuar un último control y mantención de las balizas instaladas sobre el hielo, e instalar las estructuras necesarias para la estación meteorológica que eventualmente será implementada por personal de la UGN en el futuro.

En estas campañas participó un número variable de personas, entre dos y seis, de acuerdo a las actividades que se pretendía realizar en cada una. Cada vez que se pudo se utilizó algún medio de transporte para desplazarse más rápidamente sobre el hielo (moto de nieve o tractor de nieve de marca Pisten Bully) de propiedad de la Fundación Huilo Huilo que gentilmente pusieron toda su infraestructura a disposición del estudio. En su totalidad, las salidas fueron por el día desde Neltume aprovechando el camino de acceso vehicular a los faldeos del volcán.

3.2.1. Instalación y control de balizas

A continuación se describen los datos medidos durante las distintas campañas de terreno.

3.2.1.1. Campaña N°1

La campaña se realizó los días 21 y 22 de marzo de 2013, y corresponde a la campaña N°92 desde que comenzó el programa de monitoreo del glaciar del volcán Mocho en mayo de 2003. Las condiciones de la montaña fueron típicas de fin de verano, con grietas muy marcadas que demoraban el desplazamiento y con una cubierta de nieve fresca que complicaba la detección de las mismas, especialmente hacia la zona de la línea de equilibrio y la zona de acumulación (Fig. 3.2.1.1-A).

En esta visita se realizó la medición y mantención de balizas de ablación en el glaciar Mocho y mediciones de densidad de nieve en B03 (Tabla 3.2.1.1-A). No se realizó la calicata en la baliza B18 por ausencia de nieve (Tabla 3.2.1.1-B). En la Tabla 3.2.1.1-B se observan los datos registrados en esta fecha y los valores de ablación medidos en cada baliza desde la campaña anterior.



Fig. 3.2.1.1-A. Glaciar sur-oriental del volcán Mocho-Choshuenco, sector baliza B13.

Tabla 3.2.1.1-A. Medición de densidad de nieve en B03 con un tubo muestreador metálico de forma cilíndrica de 74 mm de diámetro interior.

Prof. (cm)	Peso muestra (g)			Volumen (cm ³)	Densidad (g/cm ³)	Dens. (%)	Tipo de nieve
	Bruto	Tara	Neto				
0-25	965	290	675	1075	0,628	62,8	0-2 cm nieve fresca, 2-28 cm nieve granular
25-52	961	290	671	1161	0,578	57,8	28-45 cm nieve granular, lente de hielo de 5 mm a los 28 cm, lente de hielo de 5 mm a los 45 cm
52-74	866	290	576	946	0,609	60,9	45-100 cm nieve granular
74-85	584	290	294	473	0,621	62,1	

Tabla 3.2.1.1-B. Medición de altura de balizas del glaciar Mocho.

Baliza N°	Tipo baliza	Largo total baliza (cm)	Altura época anterior (B) (cm)	Altura original visita actual (C) (cm)	Altura modificada visita actual (cm)	Dif. de altura (B-C)	Tipo sup.	Comentario
B02	Aluminio	242	124	151	151	-27	Nieve	
B03	Aluminio	320	120	122	122	-2	Nieve	
B03b	Aluminio	242	-	-	200		Nieve	
B08	PVC	400	41	95	95	-54	Hielo	
B09	PVC	400	143	218	-23	-75	Hielo	Se reinstaló baliza por nivel de agua, quedando en su instalación modificada el tope de la baliza 23 cm bajo la superficie.
B10	PVC	400	236	281	81	-45	Hielo	
B11	PVC	400	135	216	0	-81	Hielo	Se reinstaló baliza a zona sin grieta.
B12	PVC	200	264	No encontrada	-53		Hielo	Instalado en área sin grieta, con el tope de la baliza 53 cm bajo la superficie.
B13	PVC	400	388	451	34	-63	Hielo	Se reinstaló baliza a zona sin grieta.
B14	Aluminio	566	145	256	256	-111	Nieve	
B14b	PVC	400	234	298	24	-64	Hielo	Se reinstaló baliza en el mismo punto.
B15	PVC	400	-4	42	42	-46	Hielo	
B17	Aluminio	640	276	327	317	-51	Hielo	

Baliza N°	Tipo baliza	Largo total baliza (cm)	Altura época anterior (B) (cm)	Altura original visita actual (C) (cm)	Altura modificada visita actual (cm)	Dif. de altura (B-C)	Tipo sup.	Comentario
B17b	PVC	300	150	210	55	-60	Hielo	Se reinstaló baliza en el mismo punto.
B18b	Aluminio	566	167	227	227	-60	Hielo	Tubo de 2".
B18c	Aluminio	242	-	-	159		Hielo	Tubo de aluminio de 1".
B18	PVC	300	408	467	117	-59	Hielo	
B19	Aluminio	566	73	92	92	-19	Nieve	Tubo de aluminio de 1".

3.2.1.2. **Campaña N°2**

La campaña se realizó los días 27 y 28 de abril de 2013, y corresponde a la campaña N°93 desde que comenzó el programa de monitoreo del glaciar del volcán Mocho en mayo de 2003. Esta fecha marca el comienzo del año hidrológico y del periodo de acumulación, por lo cual se instalaron balizas de aluminio (Fig. 3.2.1.2-A, Tabla 3.2.1.2-A), en perforaciones realizadas con taladro de hielo a una profundidad de 1 m aproximadamente. Los valores de altura de balizas de ablación medidos se muestran en la Tabla 3.2.1.2-B. En esta campaña no se realizaron mediciones de densidad.

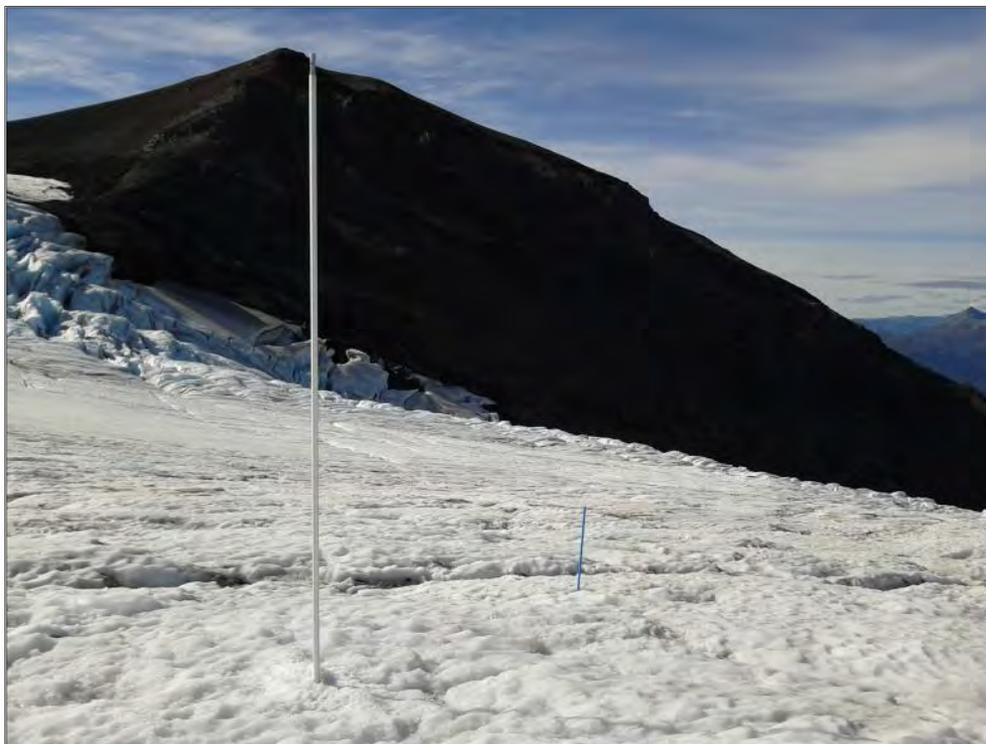


Fig. 3.2.1.2-A. Balizas de ablación (PVC) y acumulación (aluminio) en B12.

Tabla 3.2.1.2-A. Balizas de acumulación instaladas en el glaciar Mocho.

Baliza Nº	Tipo baliza	Largo total baliza (cm)	Altura modificada visita actual (cm)
B02	Aluminio	346	243
B03	Aluminio	624	244
B08	Aluminio	336	246
B09	Aluminio	336	239
B10	Aluminio	336	247
B11	Aluminio	336	249
B12	Aluminio	410	306
B13	Aluminio	335	242
B14	Aluminio	600	309
B15	Aluminio	336	238
B17	Aluminio	324	231
B18	Aluminio	566	320
B19	Aluminio	743	324

Tabla 3.2.1.2-B. Medición de altura de balizas del glaciar Mocho.

Baliza N°	Tipo baliza	Largo total baliza (cm)	Altura época anterior (B) (cm)	Altura original visita actual (C) (cm)	Altura modificada visita actual (cm)	Diferencia altura (B-C)	Tipo sup.	Comentario
B02	Aluminio	346	151	217	243	-66	Hielo	
B03	Aluminio	624	122	140	244	-18	Nieve	Se mantiene solo esta baliza.
B03b	Aluminio	242	200				Nieve	Baliza tendida en la nieve.
B08	PVC	200	95	232	32	-137	Hielo	Se instaló tubo de aluminio a 15 m por grietas.
B09	PVC	400	-23	125	125	-148	Hielo	
B10	PVC	200	81	253	53	-172	Hielo	
B11	PVC	400	0	155	155	-155	Hielo	
B12	PVC	200	-53	72	72	-125	Hielo	
B13	PVC	400	34	149	149	-115	Hielo	Se cambió posición por grietas.
B14	Aluminio	600	256	309	309	-53	Hielo	Se mantiene esta posición baliza aluminio.
B14b	PVC	400	24	152	152	-128	Hielo	
B15	PVC	200	42	115	85	-73	Hielo	
B17	Aluminio	640	317				Hielo	Se retiró baliza doblada. No se midió.
B17b	PVC	300	55	137	137	-82	Hielo	
B18b	Aluminio	566	227	320	320	-93	Hielo	Baliza de aluminio 2".

Baliza N°	Tipo baliza	Largo total baliza (cm)	Altura época anterior (B) (cm)	Altura original visita actual (C) (cm)	Altura modificada visita actual (cm)	Diferencia altura (B-C)	Tipo sup.	Comentario
B18c	Aluminio	242	159				Hielo	Baliza doblada, no se pudo sacar.
B18	PVC	150	117	222	72	-105	Hielo	
B19	Aluminio	743	92	147	324	-55	Nieve	

3.2.1.3. **Campaña N°3**

La campaña se realizó durante los días 8 al 10 de junio de 2013, y corresponde a la campaña N°94 desde que comenzó el programa de monitoreo del glaciar del volcán Mocho en mayo de 2003. Las condiciones meteorológicas presentes durante el mes de mayo, hasta el inicio de las precipitaciones a fines de mayo, provocaron ablación de hielo en la superficie del glaciar la que fue detectada a partir de mediciones de profundidad de nieve con sonda de avalanchas (Tabla 3.2.1.3-A).

Tabla 3.2.1.3-A. Medición de nieve acumulada con sonda de avalancha. N.D.: no disponible.

Baliza N°	Profundidad de nieve (cm)
B02	N.D.
B03	N.D.
B08	N.D.
B09	68
B10	87
B11	84
B12	84
B13	25
B14	135
B15	169
B17	N.D.
B18	N.D.
B19	184

Debido a una condición inusual de la nieve para la época, una capa de hielo duro cubriendo toda la superficie del glaciar (Fig. 3.2.1.3-A), no fue posible acceder hasta el glaciar en moto de nieve, ya que no se contaba con clavos en la oruga. En estas condiciones se pierde la tracción y no es posible subir, con la consecuente demora en los trabajos de medición e instalación de balizas.

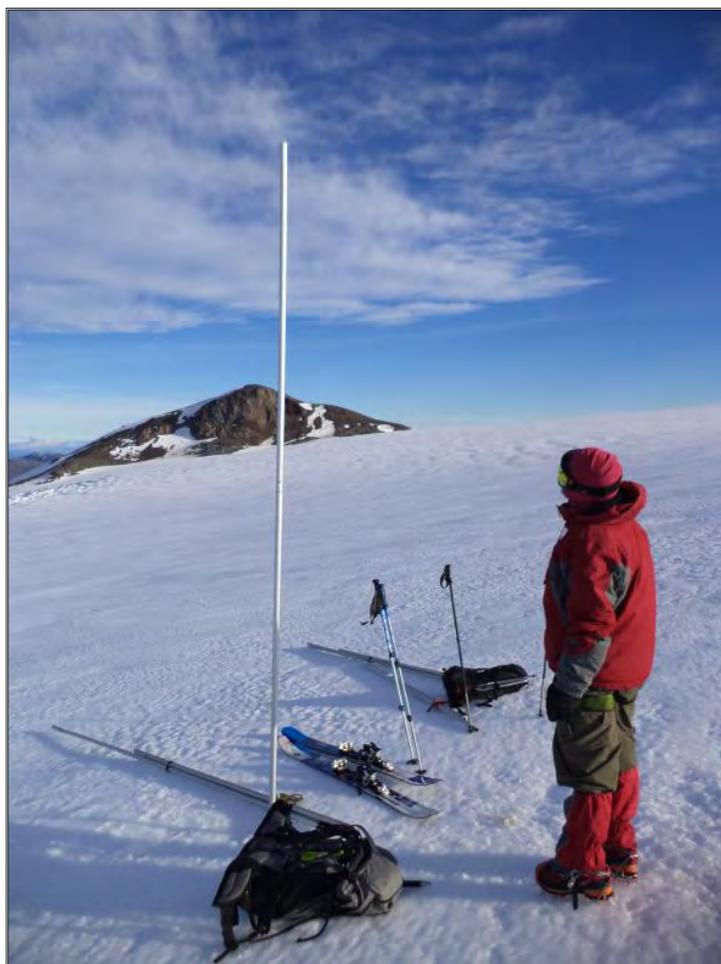


Fig. 3.2.1.3-A. Baliza de acumulación (aluminio) en B10.

En esta campaña se realizó la medición, reposición y mantención de balizas de acumulación (Fig. 3.2.1.3-A, Tabla 3.2.1.3-B). No se realizaron mediciones de densidad de nieve.

Tabla 3.2.1.3-B. Medición de altura de balizas del glaciar Mocho.

Baliza N°	Tipo baliza	Largo total baliza (cm)	Altura época anterior (B) (cm)	Altura original visita actual (C) (cm)	Altura modificada visita actual (cm)	Diferencia altura (B-C)	Tipo sup.	Comentario
B02	Aluminio	588	243	56	298	187	Nieve	
B03	Aluminio	411	244	-	326		Nieve	Baliza no encontrada.
B08	Aluminio	336	246	215	280	31	Nieve	
B09	Aluminio	336	239	219	281	20	Nieve	
B10	Aluminio	536	247	184	450	63	Nieve	
B11	Aluminio	477	249	235	388	14	Nieve	
B12	Aluminio	410	306	250	250	56	Nieve	
B13	Aluminio	335	242	245	245	-3	Nieve	
B14	Aluminio	747	309	184	331	125	Nieve	
B15	Aluminio	572	238	102	403	136	Nieve	
B17	Aluminio	574	231	76	326	155	Nieve	
B18	Aluminio	709	320	204	347	116	Nieve	
B19	Aluminio	536	324	-	352		Nieve	Baliza no encontrada.

3.2.1.4. **Campaña N°4**

La campaña se realizó el 23 de julio de 2013, y corresponde a la campaña N°95 desde que comenzó el programa de monitoreo del glaciar del volcán Mocho en mayo de 2003. Se realizaron un par de intentos sin éxito los días 18 y 19 de julio, debido a la condición de la nieve que por las altas temperaturas para la época presentaba una capa congelada hacia la zona baja del glaciar por lo que no fue posible acceder en moto de nieve, lo cual produjo una demora de 5 horas para subir con los materiales y equipos hasta la base del glaciar, por lo que se decidió continuar al día siguiente. El segundo día de trabajo no se pudo acceder al volcán por la presencia de un intenso viento puelche. Finalmente, luego de esperar buenas condiciones meteorológicas, se realizó la subida en moto de nieve con apoyo de Pisten Bully.

En esta oportunidad se midieron posiciones de balizas con DGPS (Fig. 3.2.1.4-A) y se realizó la medición, reposición y mantención de balizas de acumulación (Fig. 3.2.1.4-B y Tabla 3.2.1.4-A). No se realizaron mediciones de densidad de nieve.



Fig. 3.2.1.4-A. Medición con DGPS en B11.

Tabla 3.2.1.4-A. Medición de altura de balizas del glaciar Mocho.

Baliza N°	Tipo baliza	Largo total baliza (cm)	Altura época anterior (B) (cm)	Altura original visita actual (C) (cm)	Altura modificada visita actual (cm)	Diferencia altura (B-C)	Tipo sup.	Comentario
B02	Aluminio	242	298	-	190		Nieve	Baliza no encontrada.
B03	Aluminio	334	326	-	268		Nieve	Baliza no encontrada.
B08	Aluminio	240	280	-	203		Nieve	Baliza no encontrada.
B09	Aluminio	336	281	173	276	108	Nieve	
B10	Aluminio	243	450	-	200		Nieve	Baliza no encontrada.
B11	Aluminio	477	388	154	355	234	Nieve	
B12	Aluminio	410	250	74	309	176	Nieve	
B13	Aluminio	267	245	-	237		Nieve	Baliza no encontrada.
B14	Aluminio	410	331	-	348		Nieve	Baliza no encontrada.
B15	Aluminio	572	403	212	304	191	Nieve	
B17	Aluminio	816	326	61	303	265	Nieve	
B18	Aluminio	1100	347	79	390	268	Nieve	
B19	Aluminio	250	352	-	205		Nieve	Baliza no encontrada.

En la Tabla 3.2.1.4-A se observa que solo se encontraron 6 de las 13 balizas instaladas en el glaciar Mocho, debido a las condiciones meteorológicas adversas que afectan a esta zona que cubrieron con nieve o bien botaron por viento las balizas.

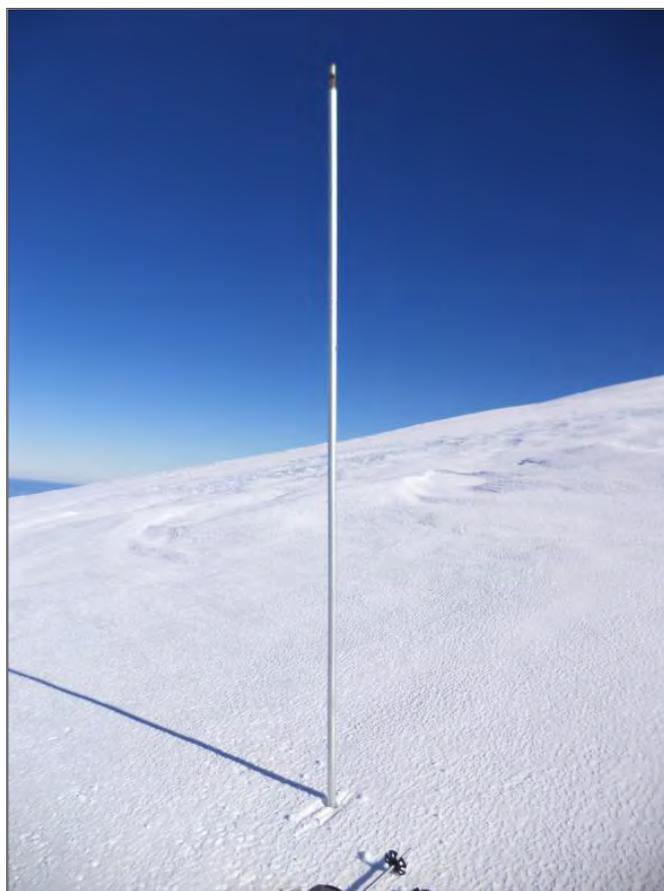


Fig. 3.2.1.4-B. Baliza de acumulación (aluminio) en B03.

3.2.1.5. ***Campaña N°5***

La campaña se realizó el 22 de agosto de 2013, y corresponde a la campaña N°96 desde que comenzó el programa de monitoreo del glaciar del volcán Mocho en mayo de 2003. Por las condiciones meteorológicas presentes durante ese mes, sólo se pudo acceder al glaciar en una ventana de tiempo de algunas horas, por lo que solamente se midió las alturas de las balizas instaladas en el sector del plateau del glaciar Mocho, de las cuales se encontraron 7 (Tabla 3.2.1.5-A).

Tabla 3.2.1.5-A. Medición de altura de balizas del glaciar Mocho.

Baliza N°	Tipo baliza	Largo total baliza (cm)	Altura época anterior (B) (cm)	Altura original visita actual (C) (cm)	Altura modificada visita actual (cm)	Diferencia altura (B-C)	Tipo sup.	Comentario
B02	Aluminio	242	190	-	-			Baliza no visitada.
B03	Aluminio	334	268	-	-			Baliza no visitada.
B08	Aluminio	240	203	42	42	161	Nieve	
B09	Aluminio	336	276	-	-			Baliza no visitada.
B10	Aluminio	243	200	15	15	185	Nieve	
B11	Aluminio	477	355	-	-		Nieve	Baliza no encontrada.
B12	Aluminio	410	309	88	88	221	Nieve	
B13	Aluminio	267	237	-	-		Nieve	Baliza no encontrada.
B14	Aluminio	410	348	54	54	294	Nieve	
B15	Aluminio	572	304	189	189	115	Nieve	
B17	Aluminio	816	303	84	84	219	Nieve	
B18	Aluminio	1100	390	170	170	220	Nieve	
B19	Aluminio	250	205	-	-		Nieve	Baliza no encontrada.

3.2.1.6. **Campaña N°6**

La campaña se realizó el 13 de septiembre de 2013, y corresponde a la campaña N°96 desde que comenzó el programa de monitoreo del glaciar del volcán Mocho en mayo de 2003. Nuevamente por las condiciones meteorológicas adversas presentes en la zona del Volcán Mocho Choshuenco, fue necesario realizar la actividad en un lapso de tiempo muy corto y en condiciones de poca visibilidad por la presencia de nubosidad baja (Fig. 3.2.1.6-A), por lo que solamente se efectuó la mantención y medición de balizas en el sector del plateau y la parte baja del glaciar (Fig. 3.2.1.6-A y Tabla 3.2.1.6-A). No se visitó la cumbre por permanecer cubierta por nubosidad baja y tampoco se midió densidad de nieve.

Tabla 3.2.1.6-A. Medición de altura de balizas del glaciar Mocho.

Baliza N°	Tipo baliza	Largo total baliza (cm)	Altura época anterior (B) (cm)	Altura original visita actual (C) (cm)	Altura modificada visita actual (cm)	Diferencia altura (B-C)	Tipo sup.	Comentario
B02	Aluminio	242	-	-	-		Nieve	Baliza no visitada.
B03	Aluminio	334	-	-	-		Nieve	Baliza no visitada.
B08	Aluminio	273	42	46	279	-4	Nieve	
B09	Aluminio	242	-	-	195		Nieve	Baliza no encontrada.
B10	Aluminio	484	15	13	254	2	Nieve	
B11	Aluminio	242	-	-	197		Nieve	Baliza no encontrada.
B12	Aluminio	651	88	104	345	-16	Nieve	
B13	Aluminio	335	-	-	263		Nieve	Baliza no encontrada.
B14	Aluminio	410	54	19	264	35	Nieve	
B15	Aluminio	572	189	186	197	3	Nieve	
B17	Aluminio	1061	84	45	290	39	Nieve	
B18	Aluminio	1100	170	161	186	9	Nieve	
B19	Aluminio	325	-	-	247		Nieve	Baliza no encontrada.



Fig. 3.2.1.6-A. Baliza de acumulación (aluminio) en B17.

3.2.1.7. **Campaña N°7**

En el mes de octubre 2013 se llevo a cabo una campaña al Volcán Mocho con el objetivo de instalar nuevas balizas de ablación, para la temporada de verano 2013-2014. Para este efecto se organizó la logística desde la localidad de Neltume. Se trabajó en la instalación y medición entre el 9 y el 15 de octubre, que corresponde a la campaña N°92 desde que comenzó el programa de monitoreo del glaciar del volcán Mocho en mayo de 2003. Los datos de densidad de nieve se indican en la Tablas 3.2.1.7-A y 3.2.1.7-B. Las balizas se instalaron en perforaciones de 6.0 a 13.7 m de profundidad realizadas con taladro a vapor (Fig. 3.2.1.7-A). Las nuevas balizas de ablación, de PVC, fueron instaladas junto a las balizas de acumulación existentes del invierno, de aluminio (Fig. 3.2.1.7-B). Las balizas de aluminio fueron retiradas, excepto la baliza 9 (Tabla 3.2.1.7-C). Los datos de las alturas de las antiguas y de las nuevas balizas están indicados en la Tabla 3.2.1.7-B.



Fig. 3.2.1.7-A. Instalación de balizas en el glaciar del volcán Mocho.



Fig. 3.2.1.7-B. Control de balizas de acumulación (aluminio) en el volcán Mocho. Inmediatamente a la derecha se observa una baliza de PVC naranja de ablación.

Tabla 3.2.1.7-A. Medición de densidad de nieve en baliza B02 (cumbre Mocho)

Prof. (cm)	Peso muestra (g)			Volumen (cm ³)	Densidad (g/cm ³)	Dens. (%)	Tipo de nieve
	Bruto	Tara	Neto				
0-20	458	246	212	497	0,426	0,43	
20-40	520	246	274	497	0,551	0,55	
40-60	512	246	266	497	0,535	0,53	Nieve granular, lente de hielo de 2,5 cm a los 46 cm
60-80	465	246	219	497	0,441	0,44	Nieve granular, lente de hielo de 2,8 cm a los 71 cm
80-100	458	246	212	497	0,426	0,43	Nieve granular, lente de hielo de 1 cm a los 86 cm

Tabla 3.2.1.7-B. Medición de densidad de nieve en baliza B18

Prof. (cm)	Peso muestra (g)			Volumen (cm ³)	Densidad (g/cm ³)	Dens. (%)	Tipo de nieve
	Bruto	Tara	Neto				
0-20	508	246	262	497	0,527	0,53	Nieve granular 0,2 mm, lente de hielo de 1 cm a los 86 cm
20-40	476	246	230	497	0,463	0,46	Nieve granular 0,2 - 0,3 cm
40-60	485	246	239	497	0,481	0,48	Nieve granular 0,2 - 0,3 cm, lente de hielo de 2 cm a los 50 cm
60-80	493	246	247	497	0,497	0,50	Nieve granular 0,2 - 0,3 cm, lente de hielo de 0,5 cm a los 72 cm
80-100	452	246	206	497	0,414	0,41	Nieve granular 0,2 cm, lente de hielo de 1 cm a los 87 cm

Tabla 3.2.1.7-C. Datos de altura de las balizas existentes en el glaciar Mocho (de aluminio) y de la instalación de las nuevas balizas de ablación (de PVC). Las alturas negativas significan que el tope de la balizas quedó bajo la superficie. En todas las balizas había superficie de nieve en la época de control.

Baliza	Fecha	Altura baliza existente de aluminio época anterior (cm)	Altura baliza existente de aluminio época actual (cm)	Diferencia de altura (cm)	Largo baliza nueva de PVC (cm)	Altura baliza nueva de PVC (cm)
2	13-10	190*	163	27	600	-2
3	13-10	268*	161	107	600	10
8	12-10	279	241	38	1.200	-12
9	13-10	195	47*	-	1.200	-170
10	12-10	254	220	34	1.200	4
11	13-10	197	172	25	1.200	81
12	12-10	345	222	123	1.050	-13
13	12-10	263	201	62	1.050	0
14	12-10	264	222	42	1.050	13
15	12-10	197	190	7	1.200	2
17	11-10	290	260	30	600	0
18	12-10	186	134	52	1.050	0
19	12-10	247	199	48	900	29

Nota: La baliza 9 existente de aluminio estaba en el suelo y se reinstaló a una altura de 47 cm a unos 20 m glaciar arriba de la posición existente, junto a la baliza 12 de PVC. *Las alturas anteriores de las balizas 2 y 3 corresponden al 23 de julio (Campaña N.4), puesto que en las Campañas N.5 y N.6 no se visitaron. La baliza 12 de PVC se instaló unos 50 m glaciar arriba de la baliza 12 de aluminio.

3.2.2. Estación fluviométrica y aforos

La instalación de la estación fluviométrica se realizó en un lugar donde ya se encontraba instalada previamente una estación que no estaba en funcionamiento por falta de mantenimiento y falla del sensor de presión. Los equipos antiguos (panel solar, regular de voltaje, batería, data logger Stevens y sensor de presión de agua) fueron retirados del lugar y trasladados a las instalaciones de la fundación Huilo-Huilo en Neltume.

La ubicación de la estación fluviométrica es en el afluente Norte del glaciar Mocho en las coordenadas UTM 18 757.421 E y 5.573.308 S. Ver Fig. 3.2.2-A.



Fig. 3.2.2-A Ubicación estación fluviométrica.

Antes del invierno se efectuó la instalación del equipo entregado por la DGA, a saber un data logger, regulador de carga y batería en la caja metálica que se encontraba en el lugar. El soporte del panel solar estaba ya instalado, y se construyó e instaló un tubo de

protección para el sensor de nivel y cable de datos en un lugar previamente preparado. Al efectuar una visita de control y descarga de datos en primavera (noviembre), se constató que por filtraciones de agua al interior de la caja el equipo y batería que se encontraban dentro, se estropeó definitivamente, y el tubo de protección del cable se había desplazado de su ubicación original, por efecto del peso de la nieve y/o avalanchas de nieve y/o rocas aparentemente.

Por lo anterior se repuso el equipo dañado, instalando una caja hermética ubicada dentro de una caja metálica anclada a la roca para evitar el daño por agua y caída de nieve y rocas, y se realizó también una modificación del sistema de protección del sensor, tubo de protección del cable y trazado hacia la caja donde se encuentra el data logger.

3.2.2.1. ***Instalación estación fluviométrica (otoño)***

Con fecha 15 al 19 de abril de 2013 se llevó a cabo una campaña a la estación fluviométrica existente ubicada en el afluente Norte del glaciar Mocho con motivo de inspeccionar las condiciones generales del lugar e infraestructura y realizar las obras menores necesarias para dejar instalada una estación fluviométrica de manera definitiva.

En esa ocasión se utilizó la caseta original del data logger que se encontraba en el lugar ya que se encontraba en buen estado y firmemente adosada a la roca, con espacio suficiente para el data logger, regulador de carga y la batería respectiva. Se instaló un data logger Campbell CR800, N° de serie 23158, un sensor de presión de agua marca Sterline N° de serie 809417, y un panel solar marca Yingli Solar 20 Watt, N° de serie 10104003100004, que fue instalado en el mismo anclaje del panel solar que se encontró en el lugar. Un regulador de carga para 12 V, N° de serie 100312. Todo el equipo fue proporcionado por la DGA. (Ver Figs. 3.2.2.1-A a D).



Fig. 3.2.2.1-A. Caseta del data logger.



Fig. 3.2.2.1-B. Data logger CR 800.



Fig. 3.2.2.1-C. Panel solar instalado y conectado a la caseta del data logger.



Fig. 3.2.2.1-D. Regulador de voltaje del panel solar.

Para la instalación del sensor de presión se fabricó un soporte consiste en un tubo de fierro de 120 mm de diámetro x 1 m de alto, con tapa perforada en el extremo superior por donde ingresa el cable del sensor que se encuentra dentro de un tubo metálico de protección de 40 mm para protegerlo de los agentes externos en el tramo ubicado desde la caseta del logger hasta el tubo porta sensor de altura de agua.

Se instaló un limnómetro adosado al exterior del tubo porta sensor. Ver Fig. 3.2.2.1-E. En la Fig. 3.2.2.1-F se observa la tubería fijada mediante pernos espárragos unidos a pernos de expansión instalados en la roca.



Fig. 3.2.2.1-E. Tubo porta sensor de presión y limnómetro.



Fig. 3.2.2.1-F. Tubería de protección del cable del sensor de presión.

3.2.2.2. ***Control en primavera y reinstalación***

Intentamos acceder al aforo para descargar los datos acumulados durante el invierno y realizar un aforo con molinete entre el día 10 y 15 de octubre, pero esto no fue posible debido a la nieve acumulada del invierno que aún mantenía bloqueado el acceso por lo que se postergó la visita hasta el 11 de noviembre. En esa ocasión se efectuó un nuevo aforo con molinete y se comprobó que el data logger, batería y regulador de carga habían sufrido un desperfecto, aparentemente por causa del agua infiltrada en la caja, así como los anclajes del tubo de protección del cable fueron cortados por efecto de la reptación del manto nival aparentemente, por lo que el equipo fue retirado del lugar para comprobar su funcionamiento en las oficinas de Geoestudios. Ver Figs. 3.2.2.2-A y B.

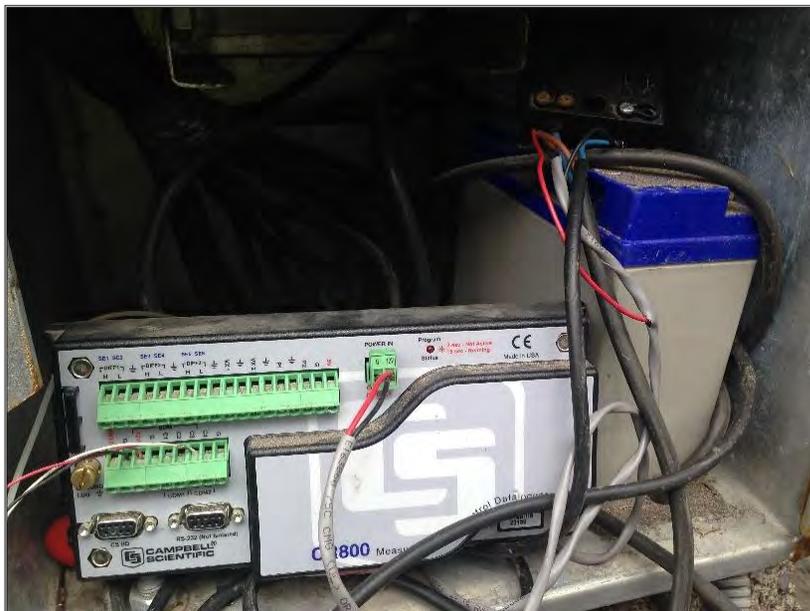


Fig. 3.2.2.2-A. Estado en que se encontró el equipo dentro de la caja.



Fig. 3.2.2.2-B. Anclajes cortados del tubo protector para el cable del sensor.

Finalmente se pudo comprobar que el equipo se encontraba totalmente estropeado por lo que se procedió a reemplazarlo por uno de similares características, data logger Campbell CR850 número de serie 25080, regulador de carga marca Phocos para 5 A, batería Curtis

18 Ah, sensor de presión KPSI serie 735 con rango de operación 0 a 5 m, número de serie 1200563. El data logger, regulador de carga y batería, fueron instalados dentro de una caja tipo NEMA4, la que a su vez fue instalada dentro de una caja metálica anclada a la roca con pernos de expansión. Cambiamos el tubo rígido de protección del cable del sensor por uno flexible anclado a la roca en diversos puntos de manera que quedara más protegido, se mejoró la salida del tubo protector del sensor para proteger de mejor manera el cable en el trayecto hasta la roca. Ver Figs. 3.2.2.2-C a E.



Fig. 3.2.2.2-C. Disposición del equipo de reemplazo dentro de las cajas de protección.



Fig. 3.2.2.2-D. Modificación a los tubos de protección del sensor.



Fig. 3.2.2.2-E. Equipo completo en su ubicación definitiva y en funcionamiento.

3.2.2.3. **Aforos**

Se efectuaron dos aforos mediante molinete Gurley-622 (ver Fig. 3.2.2.3-A) para relacionar los datos del datalogger con el caudal existente. El primero se realizó en otoño el día 5 de mayo y el segundo en primavera el 14 de noviembre de 2013, día que se efectuó la visita de control y se retiró el equipo que se encontró en mal estado. El día que se reinstaló el equipo de reemplazo (21 de noviembre de 2013), se controló la altura del agua en los mismos puntos del cauce donde se efectuó el aforo con molinete para relacionar esos datos con la información que registra el datalogger.



Fig. 3.2.2.3-A. Sección de aforo donde se realizó la medición de caudal con molinete.

Tabla 3.2.2.3-A. Aforo en otoño del caudal del estero Norte del glaciar Mocho.

AFORO CAUDAL						
ESTACION : Estero S/N,GI Mocho						
ALTITUD S.N.M. : 1.365 m s.n.m						
COORDENADAS U.T.M : 244.857 E 5.573.307 N						
FECHA AFORO : 05-05-2013						
ALTURA LM MEDIA : 0,18 m						
CAUDAL : 0,149251 m ³ /s						
VELOCIDAD MEDIA : 0,384956 m/s						
PROFUNDIDAD MEDIA: 0,240833 m cantidad abscisa						
AREA SECCION : 0,389650 m ² ultima abscisa						
PERIMETRO MOJADO : 4,694901 m						
RADIO HIDRAULICO : 0,082994 m						
FACTOR HIDRAULICO DE MANNING : 1,980026 Q/ (AR**(2/3)) 0,505043879						
FACTOR HIDRAULICO DE CHEZY : 1,329593 Q/ (AR**(1/2)) 0,752110061						
ABSCISAS	Tramo	Profundidad	Velocidad	Caudal	m ³ /s	%
	Vertical	Total	Vertical	Vertical	Acumulados	TOTAL
0,00	0,05	0,35	0,14	0,00	0,00	1,59
0,10	0,15	0,39	0,23	0,01	0,01	7,52
0,20	0,29	0,35	0,24	0,01	0,02	15,05
0,37	0,46	0,30	0,25	0,01	0,04	23,57
0,54	0,63	0,22	0,25	0,01	0,04	29,82
0,71	0,80	0,18	0,54	0,02	0,06	40,97
0,88	0,97	0,15	0,66	0,02	0,08	52,20
1,05	1,14	0,15	0,66	0,02	0,09	63,43
1,22	1,31	0,23	0,71	0,03	0,12	82,14
1,39	1,48	0,25	0,39	0,02	0,14	93,11
1,56	1,63	0,14	0,35	0,01	0,15	98,22
1,70	1,70	0,18	0,21	0,00	0,15	100,00
Observaciones : Altura limnimetrica al inicio= 0,18 m Altura limnimetrica al término= 0,18 m h instrumento = 0,12 m (medición en data logger durante la medición) octas nubosidad = 0/8						

Tabla 3.2.2.3-B. Aforo en primavera del caudal del estero Norte del glaciar Mocho.

AFORO CAUDAL						
ESTACION :		Estero S/N,GI Mocho				
ALTITUD S.N.M. :						
COORDENADAS U.T.M. :						
FECHA AFORO :		13-11-2013				
ALTURA LM MEDIA :		0,12 m				
CAUDAL :		0,1703 m ³ /s				
VELOCIDAD MEDIA :		0,4451 m/s				
PROFUNDIDAD MEDIA:		0,2133 m cantidad abscisa				
AREA SECCION :		0,3570 m ² ultima abscisa				
PERIMETRO MOJADO :		4,17457069 m				
RADIO HIDRAULICO :		0,08551778 m				
FACTOR HIDRAULICO DE MANNING :		2,4182951 Q/ (AR ^{**} (2/3))			0,41351446	
FACTOR HIDRAULICO DE CHEZY :		1,63169251 Q/ (AR ^{**} (1/2))			0,61286057	
ABSCISAS M	Tramo Vertical	Profundidad Total	Velocidad Vertical	Caudal Vertical	m ³ /s Acumulados	% TOTAL
0	0,075	0,09	0,128	0,001	0,001	0,505
0,15	0,225	0,2	0,213	0,006	0,007	4,248
0,3	0,375	0,15	0,567	0,013	0,020	11,732
0,45	0,525	0,18	0,912	0,025	0,045	26,191
0,6	0,675	0,2	1,133	0,034	0,079	46,150
0,75	0,825	0,33	1,028	0,051	0,129	76,019
0,9	0,975	0,33	0,443	0,022	0,151	88,906
1,05	1,125	0,3	0,257	0,012	0,163	95,684
1,2	1,275	0,28	0,083	0,003	0,166	97,729
1,35	1,425	0,23	0,083	0,003	0,169	99,409
1,5	1,5	0,27	0,050	0,001	0,170	100,000
Observaciones : T° ambiente 10 C°, T° agua 2,7 C° cobertura nubosa 7/8 Hora de inicio 10:30 hora de termino 11:30 Aforo vadeando						

La sección transversal fue caracterizada el día 21 de noviembre del 2013 (ver Tabla 3.2.2.3-C). En la Fig. 3.2.2.3-B se presenta la sección transversal del cauce donde se realizaron los aforos.

Tabla 3.2.2.3-C. Control de altura del caudal del estero Norte del glaciar Mocho.

21/11/2013	
16: 15 horas, cielo despejado.	
REALIZADO SOBRE UN LARGO DE 180 CM	
Distancia en cm	Altura de agua en cm
10	30
20	24
30	29
40	20
50	28
60	38
70	40
80	41
90	40
100	42
110	41
120	46
130	41
140	42
150	41
160	39
170	39
180	28

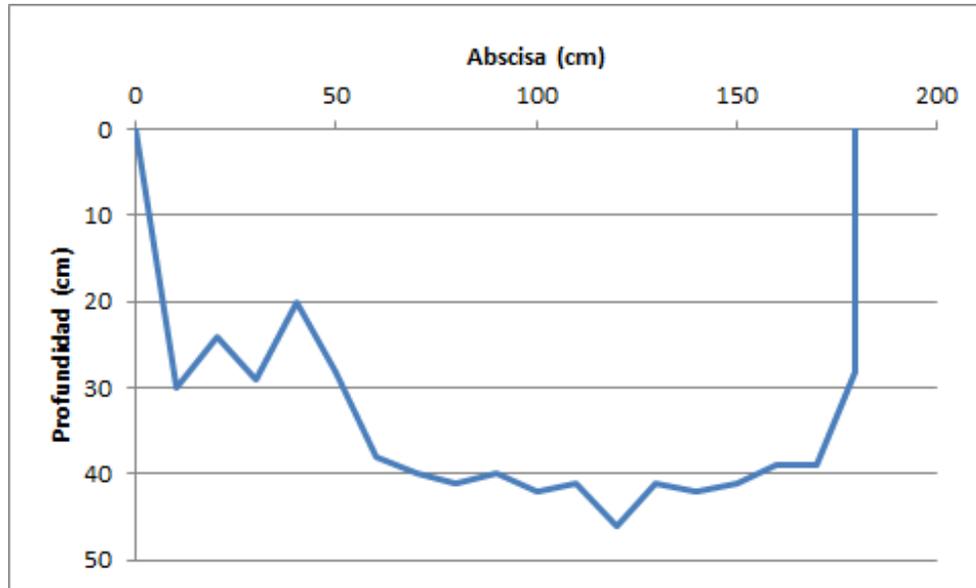


Fig. 3.2.2.3-B. Sección de Aforo en estero Norte del glaciar Mocho registrada el 21 de noviembre de 2013.

Los aforos realizados en el estero Norte del glaciar Mocho fueron de 0,15 m³/s y 0,17 m³/s, para los días 5 de mayo y 13 de noviembre, respectivamente. La curva de gasto construida a partir de estos aforos (ver Fig. 3.2.2.3-C) se realizó mediante el ajuste de una función polinomial que entrega como resultado la siguiente relación:

$$Q = 2,4 * H^{2,1}$$

Donde Q corresponde al caudal en m³/s y H la altura media del agua en la sección de aforo.

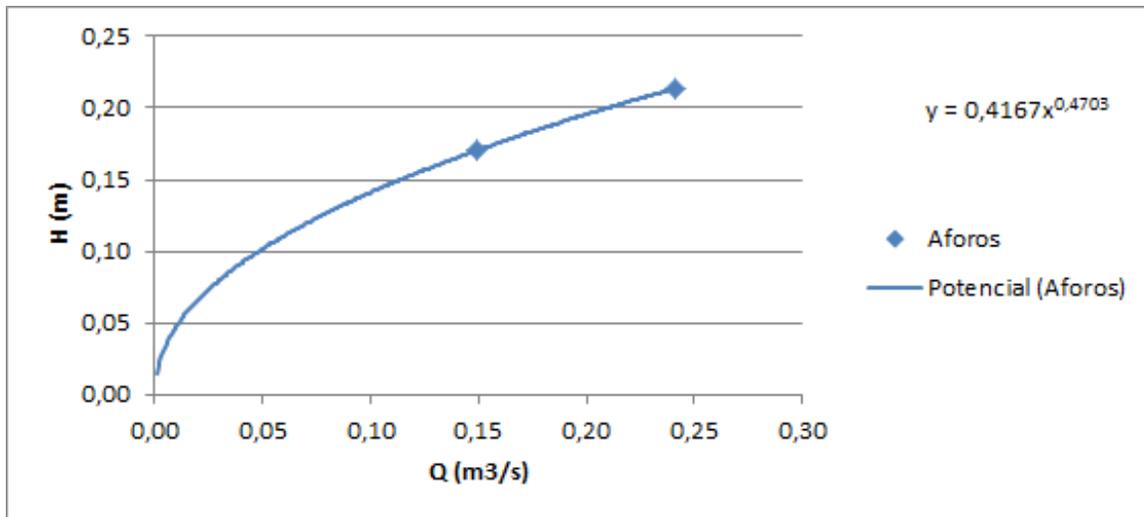


Fig. 3.2.2.3-C. Curva de Gasto en estero Norte del glaciar Mocho.

3.2.3. Instalación de la estructura de la AWS

Se realizaron las obras menores necesarias para la instalación de una estación meteorológica automática (AWS) en el lugar definido para ello en conjunto con personal de la Unidad de Glaciología y Nieves de la DGA, luego de efectuar una visita a terreno.

Se instalaron tres mástiles de acero anclados a la roca con pernos de expansión, se nivelaron con tuercas y contra tuerca, se rellenó y estabilizó la base de cada mástil con un mortero, se conectaron los tres mástiles entre sí con tubería de acero flexible recubierta con PVC para conectar los cables de los sensores y de energía desde los mástiles correspondientes al que soporta la caja del data logger. Se instaló un mástil proporcionado por la DGA de dos metros de altura con un travesaño para fijar instrumentos y una sección de tubo metálico de 32 mm de diámetro que quedó dentro de una de las cajas ya que no traía abrazaderas para fijarlo al travesaño. Tiene un cable a tierra que se fijó a una barra de tierra insertada 70 cm en una perforación en el suelo rocoso. Éste se encuentra ubicado a tres metros del mástil que tiene la caja para el data logger.

Se instaló un mástil de 1,5 m de altura y 3 pulgadas de diámetro, al que se fijó una caja de fibra clase IP 66 de 50*40*23 cm con una parrilla metálica y grilla métrica de

perforaciones para el anclaje de instrumentos y datalogger. A esta caja llegan dos tuberías flexibles, una de 2 pulgadas de diámetro desde el mástil de instrumentos, y otra de 1 pulgada de diámetro desde el mástil de energía y comunicaciones.

Se instaló un mástil de 2 metros de altura y dos pulgadas de diámetro, ubicado a 2 metros del mástil que tiene la caja para el data logger, en el que se colocaron dos soportes para paneles solares y se hicieron dos perforaciones a la misma altura para sus cables, que se dejaron cubiertos con tapones de goma. En un costado se instaló una caja plástica Pelican mod. 1620 para las baterías y el regulador de carga, que se encuentra atornillada a una parrilla metálica fija al mástil, apoyada en la roca de la base y abrazada por uno de los perfiles de la parrilla de apoyo. Esta caja se encuentra conectada al mástil con un tubo metálico flexible para pasar los cables que entren desde las placas solares y que salga con energía hacia el data logger. Ver Figs. 3.2.3-A a E.



Fig. 3.2.3-A. Vista desde aguas abajo de las estructuras terminadas.

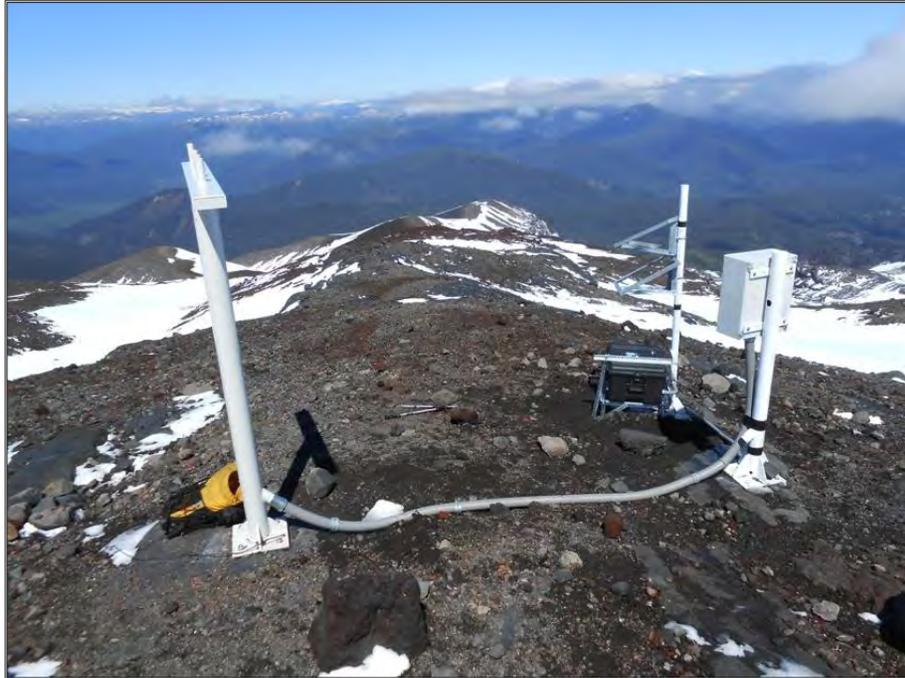


Fig. 3.2.3-B. Vista desde aguas arriba de las estructuras terminadas.



Fig. 3.2.3-C. Vista de la caja usadas para almacenar baterías, tubería para cables, y perfil para asegurar la tapa.



Fig. 3.2.3-D. Vista del mástil y caja para data logger.



Fig. 3.2.3-E. Caja para data logger y terminales de tubos flexibles.

3.2.4. Mediciones DGPS

3.2.4.1. Campaña N°4

Durante la Campaña N°4 del 23 de julio de 2013 se midieron posiciones de balizas de acumulación (aluminio) con DGPS (ver Fig. 3.2.2.4-A) y se realizó la medición, reposición y mantención de dichas balizas (ver Fig. 3.2.2.4-B y Tabla 3.2.2.4-A). Lamentablemente no se cuenta con datos de posiciones estáticas en la base de roca BMCH del volcán Mocho puesto que el receptor no capturó dichos datos. Por este motivo se contactó al SERNAGEOMIN, quienes gentilmente facilitaron los datos GPS de su estación fija Villarrica, ubicada unos 60 km al norte de BMCH correspondiente al día 23 de julio. Los tiempos de ocupación en cada baliza fueron del orden de 10 minutos. Mediante el procesamiento diferencial de los datos GPS mediante el software Trimble Business Center se obtuvieron los datos presentados en la Tabla 3.2.4.1-A.

Tabla 3.2.4.1-A. Coordenadas expresadas en proyección UTM huso 18 sur, sistema geodésico WGS84, altura elipsoidal (m) y altura ortométrica (m s.n.m) según el modelo geoidal EGM06.

Baliza	UTM E (m)	UTM N (m)	Altura elipsoidal (m)	Altura ortométrica (m s.n.m.)
B02	754.003,30	5.575.660,81	2389,58	2410,90
B03	754.178,54	5.575.566,96	2380,28	2401,61
B08	755.925,14	5.574.036,33	1883,63	1905,07
B09	756.481,03	5.573.935,76	1687,55	1709,02
B10	755.646,49	5.573.633,32	1877,65	1899,08
B11	756.221,74	5.573.988,36	1804,74	1826,19
B12	755.341,71	5.573.314,08	1814,80	1836,21
B13	754.630,19	5.573.355,91	1916,12	1937,50
B14	755.006,27	5.573.866,47	1915,36	1936,75
B15	755.536,19	5.574.388,22	1913,93	1935,34
B17	755.107,15	5.575.088,13	2028,50	2049,89
B18	754.703,71	5.574.339,83	1978,25	1999,62
B19	753.786,08	5.574.435,17	2018,04	2039,36

3.2.4.2. **Campaña N°7**

Para determinar la posición mediante GPS diferencial de la balizas instaladas en el glaciar Mocho, se ocupó la estación base BMCH que está materializada con un perno de **expansión de 5/8"** sobre un promontorio rocoso, ubicado en la cara Este del volcán, Fig. 3.2.4.2-A. Para georeferenciar este punto se utilizó la estación de referencia permanente CONZ (Concepción), con datos de libre disposición en internet (International Global Positioning System Service for Geodynamics (IGS), <http://igs.cb.jpl.nasa.gov/>), e información obtenida durante 3 días de observaciones en la campaña de octubre de 2013 (total 18 horas de mediciones). Los tiempos de ocupación de cada baliza fueron del orden de 10 minutos. El procesamiento de las líneas base se realizó con el software Trimble Business Center. Las coordenadas de la estación base Mocho se muestran en la Tabla 3.2.4.2-A.



Fig. 3.2.4.2-A. Estación base GNSS glaciar Mocho (BMCH).

Tabla 3.2.4.2-A. Coordenadas estación base glaciar Mocho (BMCH).

COORDENADAS WGS84 PUNTO BASE BMCH			
Este	755697.848 m	Latitud	S39°55'47.77173"
Norte	5575731.426 m	Longitud	W72°00'27.95310"
Elevacion	1974.339 m	Altura	1995.748 m s.n.m

Se midieron 13 balizas las que corresponden a balizas de ablación, de PVC naranja de 16 mm (Conduit), instaladas junto a las balizas de acumulación, de aluminio, a una distancia menor a 10 cm. El receptor GNSS móvil fue instalado directamente sobre la baliza en el agujero dejado por el taladro de vapor, como se muestra en la Fig. 3.2.4.2-B y la obtención de coordenadas se realizó mediante el método FastStatic, durante 10 minutos. El post proceso y el cálculo de las coordenadas definitivas se realizó con el software Trimble Business Center. La ubicación y coordenadas UTM de las balizas medidas en el glaciar Mocho se muestran en la Tabla 3.2.4.2-B.



Fig. 3.2.4.2-B. GNSS móvil montado sobre la baliza de ablación B10.

Tabla 3.2.4.2-B. Ubicación de la balizas en el glaciar Mocho, instaladas en octubre de 2013. Coordenadas expresadas en proyección UTM huso 18 sur, sistema geodésico WGS84, altura elipsoidal (m) y altura ortométrica (m s.n.m) según el modelo geoidal EGM06.

Baliza	UTM E (m)	UTM N (m)	Altura elipsoidal (m)	Altura ortométrica (m s.n.m.)
B2	754.007,49	5.575.667,74	2391,67	2412,99
B3	754.197,65	5.575.584,18	2382,21	2403,54
B8	755.929,90	5.574.037,62	1887,14	1908,58
B9	756.497,90	5.573.945,20	1689,30	1710,77
B10	755.649,09	5.573.632,25	1881,24	1902,66
B11	756.226,06	5.574.011,01	1811,47	1832,92
B12	755.324,35	5.573.360,11	1827,51	1848,92
B13	754.691,40	5.573.412,83	1916,78	1938,16
B14	755.013,04	5.573.863,26	1918,79	1940,18
B15	755.540,47	5.574.387,77	1917,51	1938,92
B17	755.113,36	5.575.085,26	2031,69	2053,07
B18	754.709,30	5.574.337,77	1981,72	2003,09
B19	753.786,44	5.574.437,33	2022,43	2043,75

3.3. VELOCIDAD DE MOVIMIENTO

Para determinar las velocidades en la superficie del glaciar Mocho, se calculó la diferencia entre las coordenadas de las balizas medidas tras la campaña 4^a realizada el día 23 de julio de 2013 y la 7^a campaña realizada entre los días 12 y 18 de octubre, que permitió determinar su velocidad de flujo y dirección del desplazamiento. En la Tabla 3.3-A se muestra la posición registrada de cada punto durante el control realizado en las campañas mencionadas.

Las velocidades calculadas varían entre 16,52 cm/día y 3,47cm/día, con un promedio de 8,09 cm/día, (ver Tabla 3.3-A). Cabe señalar que no todas las balizas medidas en la 7^a campaña pudieron ser comparadas con las medidas en la 4^a campaña, ya que fueron reinstaladas en campañas anteriores.

Tabla 3.3-A. Velocidades y rumbos de los desplazamientos de las balizas sobre el glaciar Mocho. Coordenadas expresadas en proyección UTM huso 18 sur, sistema geodésico WGS84. El azimut está referido al norte geográfico.

Balizas glaciar Mocho		Medición Octubre 2013			
BALIZA	FECHA	COORDENADAS UTM		VELOCIDAD	AZIMUT
		NORTE	ESTE	cm/día	grado sexagesimal
B8	12-10-2013	5.574.037,62	755.929,90	6,09	75
B10	12-10-2013	5.573.632,25	755.649,09	3,47	112
B12	12-10-2013	5.573.307,77	755.353,51	16,52	118
B14	12-10-2013	5.573.863,26	755.013,04	9,25	115
B15	12-10-2013	5.574.387,77	755.540,47	5,32	96
B17	11-10-2013	5.575.085,26	755.113,36	8,55	115
B18	18-10-2013	5.574.337,77	754.709,30	7,44	110

Como se aprecia en la tabla de velocidades, la mayor velocidad en el punto B12 se debe a la posición de este punto, a un pie de mayor pendiente y consecuentemente mayor velocidad en ese lóbulo del glaciar.

La magnitud de las velocidades observadas durante la campaña 7 se muestra en el plano de vectores en la Fig. 3.3-A.

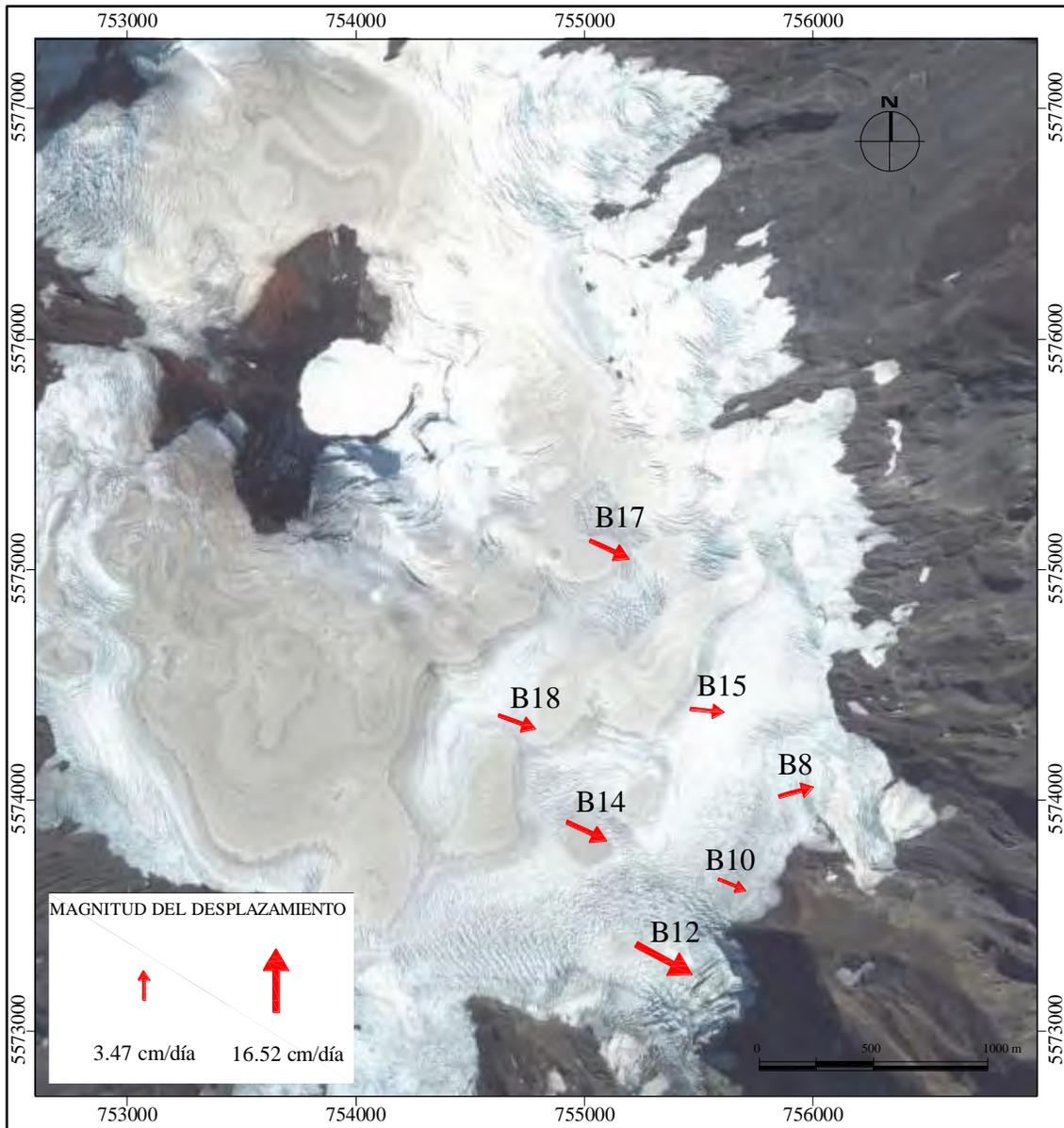


Fig. 3.3-A. Vectores de velocidad medidos en la superficie del glaciar Mocho en la campaña 7^a. La imagen satelital es Landsat 2010.

3.4. BALANCE DE MASA GLACIOLÓGICO

En la Fig. 3.4-A se muestra la distribución de las balizas del glaciar Mocho-Choshuenco en una imagen actualizada.

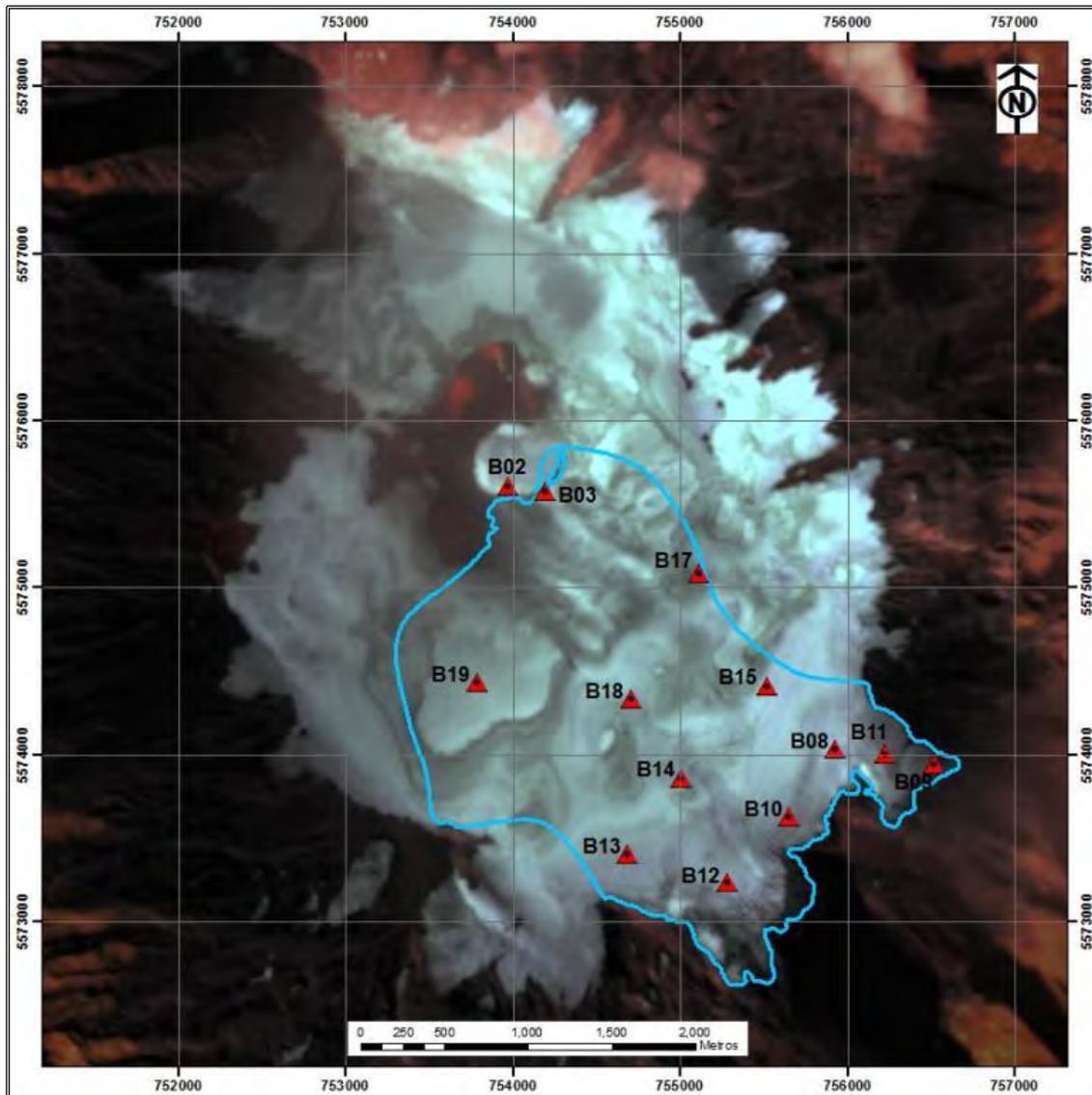


Fig. 3.4-A. Distribución de balizas en la cuenca del glaciar Mocho. Imagen de fondo Landsat 8 OLI del 18 de abril de 2013.

Basado en los datos presentados anteriormente (sección 3.2.1) donde se indican valores medidos en cada campaña, se calcula una tabla resumen con las diferencias de altura de

la superficie del glaciar respecto de la visita anterior (Tabla 3.4-A).

Tabla 3.4-A. Diferencia de altura de la superficie del glaciar Mocho medida en balizas para cada campaña (N°). Las celdas en amarillo representan cambio de altura sobre superficie de hielo. Las celdas en blanco representan cambios de altura en superficie de nieve. Valores negativos indican ablación y positivos acumulación. La fecha indica la fecha de la campaña correspondiente, y el periodo Δt es el intervalo entre la campaña anterior y la campaña actual.

N°	FECHA	Δt Días	Δh BALIZAS												
			B02	B03	B08	B09	B10	B11	B12	B13	B14	B15	B17	B18	B19
1	22-03-2013	20	-27	-2	-54	-75	-45	-81		-63	-64	-46	-60	-60	-19
2	28-04-2013	37	-66	-18	-137	-148	-172	-155	-125	-115	-128	-73	-82	-105	-55
3	10-06-2013	43				-48	-24	-70	-28	-28	-10	-33			
3	10-06-2013	43	187			68	87	84	84	25	135	169	155	116	184
4	23-07-2013	43				108		234	176			191	265	268	
5	22-08-2013	30			161		185		221		294	115	219	220	
6	13-09-2013	22			-4		2		-16		35	3	39	9	
7	12-10-2013	29	27	107	38		34	25	123	62	42	7	30	52	48

Para calcular el balance de masa entre cada época de medición (Tabla 3.4-B), se ponderan las diferencias de altura con la densidad de nieve de la época anterior si corresponde a ablación, o con la densidad de la época actual si es acumulación (Tabla 3.4-C). La densidad se mide en una calicata de 1 m de profundidad en cada campaña en las balizas B03 y B18 (Fig. 3.4-B). Luego se asume que la densidad en B03 es válida para las balizas B02 y B03 del sector somital y la densidad en B18 es válida para las restantes balizas. En el caso de presencia de hielo en superficie, cuando la capa de nieve superficial se ha derretido completamente, se considera una densidad de $0,9 \text{ g/cm}^3$.



Fig. 3.4-B. Mediciones de densidad de nieve en calicata.

Tabla 3.4-B. Balance de masa en balizas del glaciar Mocho (año 2013) para cada campaña (N°). Una acumulación (Acum.) negativa (en rojo) indica ablación, valores positivos corresponden a acumulación de nieve.

N°	FECHA	Δt	Balance de masa de balizas (m eq.a.)													Acum. periodo	
			B02	B03	B08	B09	B10	B11	B12	B13	B14	B15	B17	B18	B19		Prom
1	22-03	20	-0,2	-0,0	-0,5	-0,7	-0,4	-0,7		-0,6	-0,6	-0,4	-0,5	-0,5	-0,1	-0,4	-0,4
2	28-04	37	-0,6	-0,1	-1,2	-1,3	-1,5	-1,4	-1,1	-1,0	-1,2	-0,7	-0,7	-0,9	-0,3	-0,9	-1,4
3	10-06	43				-0,4	-0,2	-0,6	-0,3	-0,3	-0,1	-0,3				-0,3	-1,7
3	10-06	43	0,9			0,3	0,4	0,4	0,4	0,1	0,6	0,8	0,7	0,6	0,9	0,6	-1,1
4	23-07	43				0,5		1,0	0,8		0,8	1,2	1,2		0,9	-0,2	
5	22-08	30			0,7		0,8		0,9		1,2	0,5	0,9	0,9	0,8	0,6	
6	13-09	22			-0,0		0,0		-0,1		0,1	0,0	0,2	0,0	0,0	0,7	
7	12-10	29	0,1	0,5	0,2		0,1	0,1	0,5	0,2	0,2	0,0	0,1	0,2	0,0	0,2	0,9

En la Tabla 3.4-B se puede apreciar que en el mes de mayo todavía encontramos ablación y en el periodo septiembre-octubre ocurre la acumulación máxima.

Por factores meteorológicos o logísticos, no fue posible medir la densidad de nieve cada vez que se realizaban las mediciones de balizas, por lo tanto se han estimado algunos valores faltantes (Tabla 3.4-C) ajustando un polinomio de tercer orden (Tabla 3.4-D) a los datos registrados en campañas anteriores. La función se apoya fundamentalmente en la transformación de la nieve en neviza, cuyos datos en el periodo 2003-2013 muestran una evolución durante el año que se puede aproximar a una función sinusoidal. En la Fig. 3.4-C se muestra la gráfica de representación de ajuste de polinomio de tercer orden a los datos de densidad (d) medidos en terreno en las balizas B03 y B18.

Tabla 3.4-C. Densidad de nieve (g/cm³) en el glaciar Mocho. Los valores estimados están en negritas, los valores medidos sin negritas.

FECHA	B03	B18
02-03-2013	0,648	0,628
22-03-2013	0,609	0,588
28-04-2013	0,558	0,561
10-06-2013	0,491	0,481
23-07-2013	0,460	0,442
22-08-2013	0,438	0,414
13-09-2013	0,430	0,404

Tabla 3.4-D. Polinomios de tercer orden ajustados a los datos, donde y es la densidad de nieve en g/cm³ y x es el mes observado.

Estimadores	B03	B18
Desviación estándar	0,043	0,051
Error de estimación	0,064	0,078
Error estándar	0,007	0,008
Mínimo	-0,090	-0,138
Máximo	0,082	0,098
Media	-0,005	-0,006
N	37	45
R ²	0,675	0,660
Polinomios de tercer orden ajustados a los datos		
B03	$y = 0,0009x^3 - 0,0144x^2 + 0,0419x + 0,5635$	
B18	$y = 0,0012x^3 - 0,0199x^2 + 0,0678x + 0,5310$	

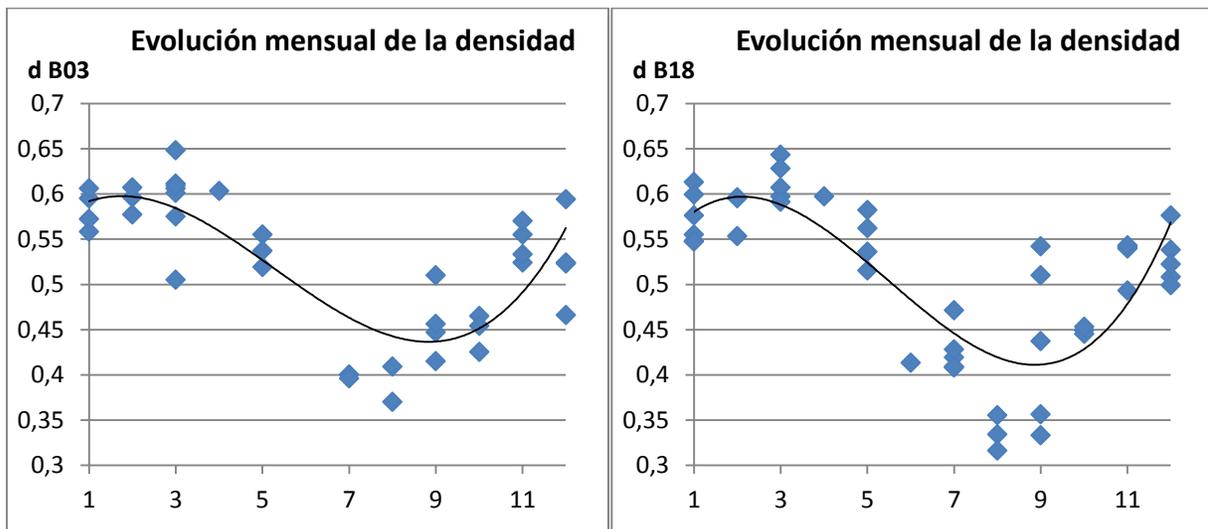


Fig. 3.4-C. Ajuste de polinomio de tercer orden a los datos de densidad (d) medidos en terreno en B03 (cumbre) y en B18. El eje de ordenadas representa la densidad en g/cm³ y las abscisas el mes (enero = 1, diciembre = 12).

3.5. ESTUDIO DE LAHARES VOLCAN MOCHO CHOSHUENCO

3.5.1. Antecedentes

Como parte del proyecto "Implementación nivel 2 estrategia nacional de glaciares: mediciones glaciológicas terrestres en Chile central, zona sur y Patagonia", se ha definido una línea de trabajo enfocada a las interacción glaciovolcánica. El fin de esta línea de trabajo es valorar los riesgos que puede provocar una erupción volcánica en un entorno glacial.

El riesgo más importante y recurrente de una erupción volcánica en un entorno con presencia de hielo y/o nieve es la formación de lahares. Los lahares son flujos de sedimento y agua que se movilizan desde las laderas de volcanes y que fluyen pendiente abajo en respuesta a la fuerza de gravedad. Para que se produzca un lahar es necesario un aporte importante de agua, que en el caso en estudio provendría de la fusión de hielo y nieve. Durante los últimos siglos, los lahares han destruido más propiedad pública o privada que cualquier proceso volcánico y han sido los causantes de la pérdidas de miles de vidas humanas.

Para valorar este riesgo el trabajo se plantea en dos partes separadas pero complementarias. La primera parte consiste en el monitoreo del entorno glaciar del volcán para conocer sus características (extensión, **espesor, acumulaciones de nieve,...**) y las variaciones a las que se encuentra sometido a lo largo del tiempo. La segunda parte se alimenta de los datos generados en la primera y consiste en (1) la estimación de volúmenes de hielo/nieve que pueden ser fundidas por las erupciones más típicas y recurrentes del complejo volcánico a estudiar. (2) A partir de la estimación de agua fundida se estiman los volúmenes de lahares (agua+sedimento) que son uno de los datos de entrada del (3) software especializado que permite estimar las áreas inundadas por este riesgo. (4) A partir de los resultados obtenidos del software se elabora un mapa de riesgos de lahares en los principales cauces que descienden del complejo volcánico. La presente sección se encarga de esta segunda parte.

Según las bases técnicas del proyecto el glaciar elegido para el estudio de la interacción glaciovolcánica debía enmarcarse en la zona glaciológica Sur A, entre las cuencas de los ríos Bío-Bío y Bueno. Tal como se ha indicado con anterioridad se escogió el glaciar

suroriental del complejo volcánico Mocho-Choshuenco (conocido generalmente como glaciar Mocho). Este glaciar drena en primera instancia en el río Blanco-Pillanleufú y a través de este en el lago Maihue, que desagua en el río Calcurrupe hasta el lago Ranco, donde nace el río Bueno. La elección de dicho glaciar se debe a que se disponen datos glaciológicos desde 2003, lo que permite una mejor caracterización del glaciar y sus variaciones. Si bien las bases técnicas indicaban el estudio de un glaciar (glaciar Mocho), Geostudios incluyó como mejora extender el estudio del riesgo por lahares a los principales cauces que descienden del volcán y especialmente en los que suponen mayor riesgo para las personas y la infraestructura presente en la zona.

El complejo Mocho-Choshuenco es volcánicamente activo, y su última erupción ocurrió en 1864 (González-Ferrán, 1995; Echegaray, 2004), aunque no presenta actualmente actividad fumarólica. Su actividad histórica y prehistórica, unido a su ubicación en la vecindad de la falla Liquiñe-Ofqui lo transforma en un volcán con alto peligro potencial de lahares, flujos de lava y piroclásticos (Naranjo et al., 2001).

3.5.2. Objetivos

El objetivo principal del estudio es la elaboración de un mapa de riesgos por lahares y poder determinar las áreas de mayor riesgo para la población local y la infraestructura presente en la zona. Para conseguir este objetivo principal se establecen los siguientes objetivos específicos.

- Realizar un análisis de antecedentes para definir las zonas de mayor riesgo para la población e infraestructura.
- Generar información de volúmenes de hielo y/o nieve de las lenguas glaciares de las cabeceras de los cauces principales.
- Caracterizar masas glaciares presentes en las nacientes de cada cuenca y cobertura nival estacional (volúmenes, equivalencia en agua disponible, etc.), con el objeto de estimar un volumen equivalente en agua máximo disponible, en términos de volúmenes y áreas de los glaciares, en las nacientes de cada cauce y cobertura (volumen) de nieve temporal.

- Definir los escenarios eruptivos probables sobre la base de la historia eruptiva del volcán.
- Caracterizar los lahares (históricos, prehistóricos) del complejo volcánico Mocho-Choshuenco para conocer sus características reológicas y de esta manera estimar la relación sedimento/agua.
- Determinar volúmenes de lahares en función de los escenarios eruptivos definidos, de la cantidad de hielo/nieve fundida y de la proporción agua/sólido de los flujos.
- Modelar y simular el proceso en cada cauce (base DEM; programas LAHARZ y MSF) determinando de esta manera las áreas inundables más probables.
- Elaboración del mapa de riesgos por lahares de los cauces principales.

3.5.3. Ubicación

El área del estudio se encuentra en la XIV región (región de Los Ríos) de Chile y comprende sectores de las comunas de Panguipulli, Los Lagos y Futrono. Así el área de estudio se extiende aproximadamente desde los 39°48' de latitud sur hasta los 40°15' y desde los 71°51' de longitud oeste a los 72°10'. Las zonas Norte y Este del macizo volcánico drenan a la cuenca del río Valdivia y las zonas Este y Sur hacia el río Bueno.

El Complejo Volcánico Mocho-Choshuenco (CVMCH, 39°55'S/72°02'O) comprende la Reserva Nacional Mocho-Choshuenco y, hacia el este, parte del parque privado denominado Reserva Biológica Huilohuilo. A sus pies se encuentran diversas localidades turísticas como Choshuenco (lago Panguipulli), Puerto Fui (lago Pirehueico) y Futrono (lago Ranco), además de centros poblados con importante desarrollo industrial maderero, como Neltume. En el pie norte y noreste del volcán se sitúa el camino internacional que une las localidades de Panguipulli, Neltume y Puerto Fui con el caserío de Puerto Pirehueico (ruta lacustre) y esta última localidad con San Martín de los Andes, en Argentina, a través del Paso Huahum. En el pie sur del complejo volcánico existen dos caminos de temporada, que se internan hacia el volcán desde las localidades de Futrono y Llifén, a orillas del lago Ranco, a lo largo de los ríos Caunahue y Florín. Los accesos

directos al volcán corresponden a dos caminos ripiados aptos solo para vehículos doble tracción: uno por el sector oeste que accede al Refugio de la Universidad Austral de Valdivia y otro por el flanco nororiental dentro de la Reserva Huilohuilo, donde se desarrollan actividades deportivas y se ha implementado un modesto centro de ski.

El estudio de peligros de lahares se centra en el cráter del volcán Mocho y comprende los cauces principales que bajan desde su cima, es decir (empezando por el Norte y en sentido horario): estero Punahue, quebrada sin nombre N (Norte, entre estero Punahue y río Truful), río Truful, quebrada sin nombre NE (Noreste, entre río Truful y quebrada Honda), río Blanco-Pillanleufú, río Mocho, río Chico, río Blanco y estero Pirinel. En la Fig. 1.3-A se detalla el área de estudio con indicación de los principales cauces. No se han evaluado los cauces de los ríos Caunahue y Florín porque no nacen en el volcán y los lahares no pueden superar las divisorias de aguas que los separan de los cauces que si nacen en el cono. En el mapa de peligros del complejo volcánico (Moreno y Naranjo, 2006) tampoco son considerados estos cauces como de peligro por lahares.

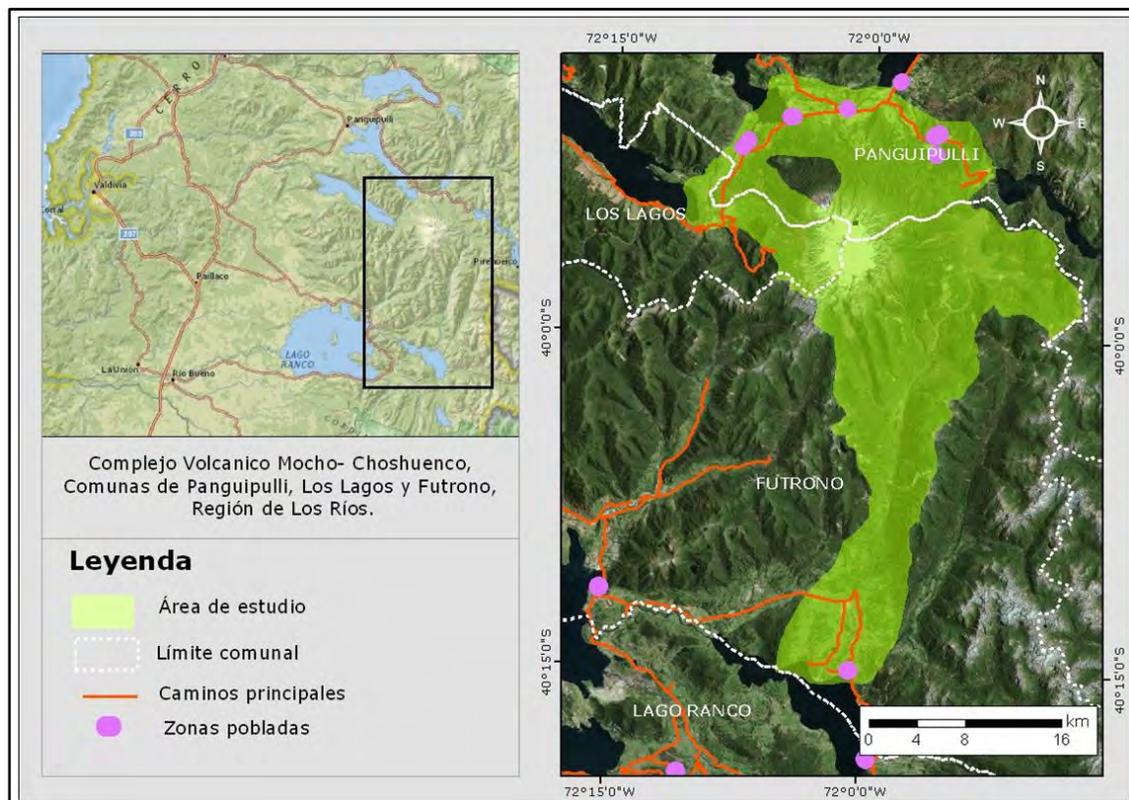


Fig. 3.5.3-A. Ubicación área de estudio.

3.5.4. Metodología

Para poder generar un mapa de riesgos por lahares en el entorno del volcán Mocho-Choshuenco se ha seguido un proceso que se resume en los siguientes puntos:

1. Revisión de antecedentes geológicos del volcán y división en cuencas de los principales cauces que descienden del volcán.
2. Reconstrucción en la medida de lo posible de la historia eruptiva del volcán y definición del tipo de erupciones más frecuentes en las últimas activaciones del volcán.
3. Establecimiento de los escenarios eruptivos del volcán.
4. Caracterización de la reología de los flujos laháricos del volcán en función de afloramientos detectados en terreno.
5. Estimación de los volúmenes de agua disponibles para producir lahares. Para ello en cada escenario se han considerado dos posibilidades, (1) que la erupción ocurra a finales de verano, momento en el cual la práctica totalidad de la nieve de temporada ha desaparecido y solamente queda disponible para fusión el hielo glaciar, este subescenario correspondería al volumen mínimo de agua disponible; y (2) el subescenario correspondiente al volumen máximo de agua disponible que sería aquel en el cual la altura de nieve de temporada es máxima.
6. Cálculo de los volúmenes de lahar a partir de los volúmenes de agua disponibles, de la cantidad fundida en cada escenario y del porcentaje de sólidos estimados a partir de la reología del flujo.
7. Modelización de lahares con el software Laharz y MSF.
8. Elaboración de mapa de riesgos de los principales cauces que descienden del volcán.

A continuación se detallan las metodologías utilizadas en la estimación de espesores de hielo y nieve, estimación de volúmenes de lahares y en la modelización de los flujos laháricos con el software MSF y LaharZ. Para la caracterización de la reología del flujo se ha interpretado el tipo de flujo que depositó los sedimentos a partir de las facies observadas en terreno.

3.5.4.1. **Metodología estimación nieve y hielo**

Para la estimación de los caudales de los lahares, en cada escenario se han considerado dos posibilidades, (1) que la erupción ocurra a finales de verano, momento en el cual la práctica totalidad de la nieve de temporada ha desaparecido y solamente queda disponible para fusión el hielo glaciar, este subescenario correspondería al volumen mínimo de agua disponible; y (2) el subescenario correspondiente al volumen máximo de agua disponible que sería aquel en el cual la altura de nieve de temporada es máxima. Según los antecedentes de la zona esto corresponde a finales de invierno o inicio de primavera.

3.5.4.1.1 Metodología estimación manto de nieve

Para la estimación del manto de nieve se han utilizado los datos de acumulación anual de nieve (equivalente en agua) generados por Casassa et al en el marco del monitoreo glaciológico que se está realizando en el glaciar Mocho desde el año 2003. Este glaciar se sitúa al sudeste del volcán. Los datos fueron tomados en las balizas de ablación del monitoreo glaciar. A partir de estos datos se ha procedido de la siguiente manera.

1. Se ha dividido la zona cubierta por el manto de nieve invernal en franjas de 200 m de cota. Los datos de la zona indican que la cota inferior del manto de nieve invernal se sitúa aproximadamente a unos 1.000 m s.n.m.
2. De los datos utilizados se ha obtenido el año de mayor acumulación de precipitación, que corresponde al año hidrológico 2009-2010.

3. Se ha obtenido la acumulación media de todas las balizas comprendidas en cada franja de cota. Obteniéndose así la acumulación media de cada franja.
4. Los datos disponibles solo alcanzan por su límite inferior hasta aproximadamente la cota 1.700, por lo cual ha sido necesario extrapolar los datos hacia las franjas inferiores correlacionando la cota media de las franjas con la acumulación media en las franjas con datos disponibles.
5. Una vez obtenidos los datos de acumulación media por franja se han obtenido los volúmenes totales de agua disponibles por franja y por cuenca.

3.5.4.1.2 Metodología estimación espesor de hielo

Para estimar el espesor de hielo y con ello el volumen de agua disponible para fundir, se han realizado perfiles de radar que permiten estimar con bastante precisión el espesor de hielo. Se han utilizado dos sistemas, uno terrestre y otro desde helicóptero.

La exploración electromagnética mediante radar para hielo puede ser empleada tanto en la superficie de un glaciar, portado por personas o montado en un trineo, o bien montado en un avión o helicóptero.

Los radares utilizados para medir espesores de hielo operan, esencialmente, emitiendo un pulso electromagnético por una antena, el pulso viaja hacia el fondo del glaciar rebota en las rocas o sedimentos en la base del glaciar y asciende hacia la superficie, donde lo recibe otra antena, de manera que conociendo la velocidad de propagación de la onda en el hielo (0,168 m/ns en hielo y del orden de 0,237 m/ns en nieve seca) y el lapso de tiempo entre la emisión y la recepción, es posible determinar el espesor de hielo

Las principales características del radar terrestre utilizado son:

- a) Frecuencia central 5,2 MHz.
- b) Longitud del medio dipolo de 8 m, en total una antena de 40 m (8 m

- x 4, más 8 metros de separación).
- c) Potencia de salida instantánea 1 KW.
 - d) Tensión de salida 900 V.
 - e) Tiempo de subida 20 ns.
 - f) PRF (tasa de repetición de pulsos) 1000 pps.
 - g) Temperatura de operación -20°C a 50°C.
 - h) Rango de mediciones en hielo, máximo 500 m.
 - i) Resolución 10 m.
 - j) Velocidad de conversión analógica digital 80Msps.
 - k) Dos canales de conversión (alta y baja ganancia).
 - l) Rango de atenuación digital 30 dB.
 - m) Georeferenciación directa de cada traza.

Las características del radar de helicóptero son:

- a) Antena de 25 MHz (modelo BGR-P30).
- b) Antena colgante tipo bow-tie, de aproximadamente 6x4x0.8 m y un peso de unos 350 kg.
- c) Transmisor que genera un pulso de 3000 Volts con una PRF (Pulse Repetition Frequency) de 5 kHz.
- d) Receptor GPS de doble frecuencia y un altímetro láser puntual que indica, por medio de un visor en cabina, en tiempo real, la altura de la antena sobre la superficie.
- e) En tierra se instala un receptor base GPS durante cada vuelo para posteriormente aplicar DGPS.
- f) A bordo se disponen dos computadores portátiles, uno para el sistema de navegación, y otro para la recepción de los datos del radar y el láser.
- g) Velocidad de crucero durante las mediciones de 40 nudos, lo que asegura aproximadamente 1 traza de radar cada 2 m sobre el terreno
- h) La altura de vuelo sobre el glaciar debe ser de 20 m a un máximo de 50 m medidos bajo la base de la antena de radar hacia la superficie de hielo.

El método de medición es continuo (en movimiento sobre una trayectoria); los datos entregados por el radar en la imagen raster corresponden a profundidad en un cierto periodo de tiempo. Se debe ligar la medición de espesor con las coordenadas obtenidas con el GPS, para así obtener una imagen que represente profundidad/distancia, y obtener información de espesor en puntos georeferenciados a lo largo de una trayectoria.

Una vez obtenidos los datos de espesor de hielo de los diferentes perfiles realizados se ha calculado la cota del fondo rocoso en los puntos medidos. A partir de esos puntos y conjuntamente con los datos de cota del borde rocoso de glaciar se ha interpolado un DEM del fondo de la caldera volcánica, es decir el substrato rocoso bajo el glaciar. De esta manera se ha obtenido el espesor de hielo (y de ahí el volumen) de la resta entre el DEM topográfico y el DEM del fondo de la caldera. Con los datos del volumen estimado y a partir de los escenarios eruptivos definidos se ha estimado la cantidad de hielo fundido por cuenca y escenario.

3.5.4.2. **Metodología estimación volumen de lahares**

De la revisión de información vulcanológica (ver capítulo 3.4.6.7) se deduce que las últimas erupciones del volcán Mocho-Choshuenco han sido principalmente de tipo subpliniana a pliniana. Este tipo de erupciones genera flujos laháricos debido principalmente a la erosión y fusión de la nieve y hielo por los siguientes procesos:

- Oleada de piroclastos turbulentos
- Flujos de piroclastos turbulentos
- La caída de tefra y los depósitos estacionarios de flujo piroclástico
- La actividad sísmica y volcánica

Para la estimación del volumen de nieve y hielo que podría generar flujos laháricos en este tipo de escenario hemos tomado como referencia los porcentajes de nieve y hielo afectados por este tipo de procesos en el Nevado del Ruiz (erupción de 1985), que fueron estudiados por Pierson (1985), Pierson (1990), Thouret (2007) y Huggel (2007). A partir de los porcentajes de hielo y nieve fundidos en esa erupción y comparando su magnitud con las de los escenarios definidos, se han estimado la cantidad de agua fundida a partir del hielo/nieve.

Aunque los datos volcanológicos no indican que se hallan dado erupciones efusivas en los últimos tiempos, se ha optado por definir un escenario de estas características debido a que en el pasado sí que ha ocurrido este tipo de erupción y también como ejercicio. Para este escenario se han simulado posibles rutas de coladas con un ancho promedio de coladas andesíticas y se ha considerado que son emitidas a una tasa que permita fundir todo el espesor de hielo del glaciar, tal y como ocurrió en el volcán Villarrica en la erupción de 1971.

Una vez definidos los volúmenes de agua que contribuye a la formación de lahares para cada escenario, se ha procedido a añadir volúmenes de sólidos basándonos en la información teórica y los datos observados en terreno. Con esto se han obtenido rangos de volúmenes de los lahares que pueden descender por las faldas del volcán en cada uno de los escenarios.

3.5.4.3. **Metodología modelización lahares**

Para la modelización de lahares se han utilizado dos programas informáticos: LaharZ y MSF. Se ha decidido utilizar estos dos programas porque son los utilizados con mayor frecuencia en este tipo de estudios, habiéndose aplicado en un número cada vez mayor de volcanes. El hecho que se usen dos programas diferentes permite comparar los resultados y verificar la consistencia del modelo.

3.5.4.3.1 Metodología LaharZ

LAHARZ es un programa computacional, desarrollado por el Servicio Geológico de Estados Unidos en 1998 (Iverson et al., 1998; Schilling, 1998) que permite delinear zonas de peligro volcánico, asociadas a la posible inundación generada por flujos laháricos a través de un método semi-empírico. Este modelo está implementado en el ambiente ArcGIS y ha sido ampliamente utilizado en diversos volcanes alrededor del mundo (Schilling et al., 2001; Canuti et al., 2002; Stevens et al., 2002; Hubbard et al., 2007, por citar algunos ejemplos).

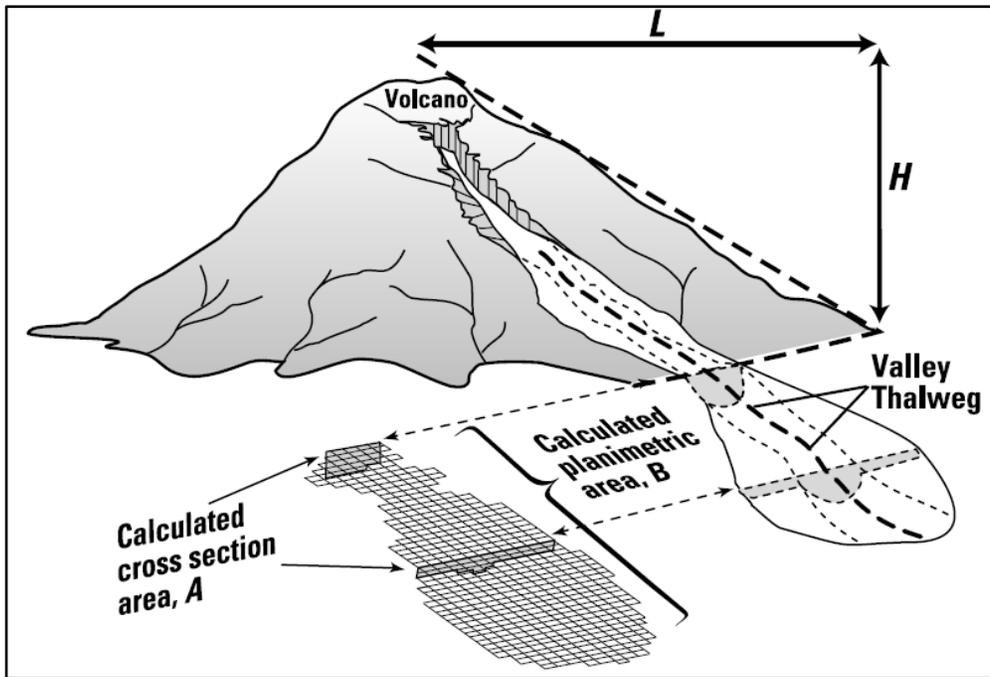


Fig. 3.5.4.3.1-A. Sección transversal (A) y planimétrica (B) definidas para un lahar, que se utilizan en el programa LAHARZ. La razón H/L describe el alcance de la zona de peligro proximal, a partir del cual comienza la depositación en la simulación (de Schilling, 1998).

El método utiliza una combinación de análisis dimensional y estadístico para determinar las áreas de inundación transversal (A) y planimétricas (B) generadas por el flujo lahárico, en función del volumen de éste (Fig. 3.5.4.3.1-A). A través de una serie de ecuaciones en que se asume una masa y densidad constante y, por lo tanto, un volumen constante, se llega a las siguientes relaciones (los detalles de la derivación de las ecuaciones se encuentran en Iverson et al., 1998)(Castruccio, 2008):

$$A = C V^{2/3}$$

$$B = c V^{2/3}$$

En que V es el volumen del lahar, C y c son constantes adimensionales. Para calcular las constantes adimensionales C y c, se utilizaron los datos de volumen e inundación de 27 lahares en 9 volcanes, determinados a partir de depósitos y observaciones de lahares recientes, más algunos datos de experimentos en flujos de volumen más pequeño. Las

ecuaciones quedan entonces de la siguiente manera (Castruccio, 2008):

$$A = 0,05 V^{2/3}$$

$$B = 200 V^{2/3}$$

Con estas 2 ecuaciones se puede predecir las áreas de inundación producidas por lahares de diferentes volúmenes.

El punto en el cauce a partir del cual el flujo lahárico comienza a inundar es definido por la intersección del cauce con el límite de la zona de peligro cercano, definido por el usuario, de acuerdo a la geología e historia eruptiva del volcán.

Según Castruccio (2008) el parámetro C de la ecuación A no se ajusta a lo ocurrido en el volcán Villarrica en erupciones históricas, por ello optó por modificarlo de manera que se ajustara mejor a la extensión de los lahares históricos, adoptando un valor de 0,015. Dada la inexistencia de datos en el volcán Mocho-Choshuenco se ha optado adoptar el valor de Castruccio para la modelación mediante Laharz realizada en este estudio.

De esta manera el procedimiento utilizado es el siguiente:

1. Elección del DEM. Para el caso estudiado y según las indicaciones de Castruccio (2008) se ha escogido un DEM generado a partir de las curvas de nivel IGM de la zona.
2. Mejora de las curvas de nivel en aquellas zonas donde ha sido necesario. Especialmente en zonas llanas (Castruccio, 2008) y en zonas con rupturas de pendiente marcadas y conocidas que el software de interpolación no ha reproducido adecuadamente. Para ello se añadieron manualmente puntos de cota y curvas de nivel y además se delimitaron los lagos.
3. Interpolación del DEM a partir de las curvas de nivel mejoradas. Se escogieron dos métodos de interpolación del abanico de posibilidades que ofrece el software ArcGIS. El primero consistió en la utilización de la herramienta "TopoRaster" que genera un DEM directamente de los datos de entrada

(curvas de nivel y puntos de cota). El segundo método utiliza un TIN intermedio a partir del cual se interpola el DEM Raster.

Se optó por generar dos DEMs para que se complementaran mutuamente ya que ningún método de interpolación garantiza que el resultado refleje exactamente la realidad.

4. Una vez generados los dos DEMs se eligió el generado con la herramienta **“TopotoRaster”** ya que se consideró más representativo de la realidad. Sobre este DEM se procedió a hacer correr el programa, para cada una de las cuencas. De los resultados se pudo concluir que zonas ofrecen mayor posibilidad de ser afectadas por lahares y se descartaron aquellas zonas que se consideraron errores atribuibles al DEM.

3.5.4.3.2 Metodología MSF

El modelo MSF (siglas de Modified Single – Flow Direction Model o Modelo de Flujo de Dirección Única Modificado) fue desarrollado por Huggel et al. (2003) para determinar las zonas de peligro asociadas a flujos de detritos generados por el desbordamiento de lagos glaciales en alta montaña. Fue aplicado por primera vez en los Alpes suizos y recientemente en el volcán Popocatepetl (Huggel et al., 2007) y el Iztaccíhuatl (Schneider, 2008), ambos en México.

El modelo está integrado en el ambiente ArcGIS y posee 2 componentes: trayectoria y distancia de corrida. La componente de trayectoria usa el algoritmo D8 que consiste básicamente en que desde una celda el flujo siga como trayectoria la dirección con mayor pendiente de entre las ocho celdas que le son adyacentes. Para zonas más planas, donde los flujos tienden a expandirse lateralmente, se agregó una función especial que permite al flujo desviarse de la dirección principal de mayor pendiente hasta 45° en ambos lados. Una vez que las zonas potencialmente afectadas por el paso de un flujo son delineadas, el programa también asigna un valor de probabilidad a cada celda del DEM, de ser afectadas por el flujo. Esta probabilidad está descrita por la función F_r que utiliza como principio el hecho que mientras más se desvíe una celda de la trayectoria de mayor pendiente, mayor es la resistencia. La razón H/F_r , donde H representa la distancia horizontal con respecto al punto de partida del flujo, determinado por el usuario, representa una función probabilística, y cada celda del DEM tiene asignada una probabilidad de ser afectada por

el lahar, definida por:

$$P_q(i) = H(i) / F_r(i)$$

$P_q(i)$ no es una función de probabilidad en sentido estricto, sino más bien una probabilidad cualitativa. La componente de distancia de corrida, a su vez, está dada por la relación V/L en que V es la distancia vertical que el flujo desciende y L es la distancia horizontal recorrida. La relación V/L debe ser definida por el usuario y debe corresponder **al "peor escenario", esto es, la máxima extensión que podría tener un flujo en la zona estudiada, de acuerdo a los datos de que se dispongan.**

Problemas con el modelo pueden surgir a partir de errores en la dirección de flujo, que a su vez se originan en errores en el DEM. Estos errores o una resolución de celda insuficiente pueden provocar que el flujo se desvíe sustancialmente de la dirección de máxima pendiente. Aunque esto puede provocar desvíos del flujo no realistas, puede ocurrir que esos desvíos sean puntos críticos para la evaluación de riesgos y por ello deben ser adecuadamente chequeados.

De esta manera el procedimiento se establece de la siguiente manera:

1. Elección del DEM. Para el caso estudiado y según las indicaciones de Castruccio (2008) se ha escogido un DEM generado a partir de las curvas de nivel IGM de la zona.
2. Mejora de las curvas de nivel en aquellas zonas donde ha sido necesario. Especialmente en zonas llanas (Castruccio, 2008) y en zonas con rupturas de pendiente marcadas y conocidas que el software de interpolación no ha reproducido adecuadamente. Para ello se añadieron manualmente puntos de cota y curvas de nivel y además se delimitaron los lagos.
3. Interpolación del DEM a partir de las curvas de nivel mejoradas. Se escogieron dos métodos de interpolación del abanico de posibilidades que ofrece el software ArcGIS. El primero consistió en la utilización de la herramienta **"TopoRaster"** que genera un DEM directamente de los datos de entrada

(curvas de nivel y puntos de cota). El segundo método utiliza un TIN intermedio a partir del cual se interpola el DEM Raster.

Se optó por generar dos DEMs para que se complementaran mutuamente ya que ningún método de interpolación garantiza que el resultado refleje exactamente la realidad.

4. Una vez generados los dos DEMs se procedió a hacer correr el programa para cada una de las cuencas y para cada DEM. De la comparación de resultados se pudo concluir que zonas ofrecen mayor posibilidad de ser afectadas por lahares y se descartaron aquellas zonas que se consideraron errores atribuibles al DEM.

3.5.5. Limitaciones

Las limitaciones básicas del presente estudio son aquellas referentes a la escasez de afloramientos de sedimentos laháricos existente. El volcán Mocho-Choshuenco no presenta erupciones recientes (la más reciente es de 1864) y por ello los sedimentos laháricos que pudiese haber producido en el pasado han sido erosionados en su mayor parte y los que no, se hallan recubiertos por una espesa vegetación que dificulta su análisis y cartografía. Sin una buena cartografía de los lahares ocurridos no se puede calibrar el software existente a las características del volcán en estudio, por ello se han utilizados los parámetros de calibración de Castruccio (2008) para el volcán Villarrica, lo cual implica que la extrapolación puede presentar imprecisiones.

Otro gran factor limitante es la no realización de ensayos de laboratorio que permitan caracterizar en detalle la composición textural de los sedimentos laháricos. La descripción de los depósitos se ha realizado exclusivamente de manera visual, estimando la cantidad de cada componente según nuestro criterio experto. Tampoco se han realizado ensayos que permitan datar los depósitos, por lo que no se han atribuidos los depósitos hallados a ninguna época en concreto.

En cuanto a la información sobre nieve, el principal factor limitante es la no existencia de información periódica sobre altura de nieve en el volcán y la escasa información de

espesor de hielo. No existen registros oficiales sobre la altura de nieve en la zona ni de su variación con la cota. No existen registros periódicos de alturas de nieve en el volcán por lo que se han utilizado datos de acumulación anual de nieve en equivalente de agua. Estos datos se enmarcan dentro de los estudios glaciológicos llevados a cabo por Casassa et al desde 2003 y tienen la limitación de que solo abarcan la sección sudeste del volcán y solo se disponen datos de los últimos 10 años.

En cuanto a la información de espesores de hielo cabe decir que los perfiles de radar realizados solo ofrecen datos del punto por donde pasas por lo cual para el resto de puntos se ha realizado una interpolación. La existencia de zonas con pocos datos condiciona sobremanera la interpolación, pudiéndose obtener datos no fiables. Para corregir estos puntos se añadieron puntos a partir del trabajo de Rivera et al de 2006 en el volcán. No se ha obtenido acceso directo a los datos originales por lo que se ha tenido que estimar los espesores a partir de la información publicada, no siendo esta la mejor de las opciones. Para evitar modificaciones excesivas solo se han añadido algunos pocos puntos, necesarios para evitar resultados absurdos en la interpolación. A parte de estas limitaciones se ha de añadir las posibles variaciones de espesor que haya podido sufrir el glaciar entre la toma de datos (2004) y la actualidad.

Referente a los DEMs utilizados es necesario mencionar que se ha generado un DEM con resolución de celda de 25x25 m, a partir de las curvas de nivel IGM con equidistancia 50 m. Tal como indica Castruccio (2008) un DEM generado a partir de estas curvas ofrece un buen resultado general pero tiene problemas donde las curvas de nivel se espacian (zonas llanas) por lo cual se ha tenido que intercalar curvas de menor equidistancia en dichas zonas llanas (sectores Enco, Choshuenco y Arquihue) y delimitar los lagos con su cota ya que no se encontraban delimitados con las curvas de nivel IGM. Además se han añadido puntos de cota que permiten mejorar la interpolación del software y corregir depresiones generadas por el programa y que no existen en la realidad (sinks). Si bien la resolución utilizada es buena, algunos de los procesos utilizados habrían obtenido mejores resultados de haber utilizado una resolución menor, interpolar el DEM a una resolución menor a partir de curvas de equidistancia 50 m no hubiese devuelto resultados fiables.

3.5.6. Contexto regional

El área del CVMCH se encuentra en medio de un sector andino, donde el relieve es irregular y accidentado, con valles profundos y cumbres que promedian los 1500 m s.n.m. El cono central del volcán Mocho es la mayor elevación de la zona, sobrepasando los 2400 m s.n.m. Esta morfología sería el resultado de procesos tectónicos e intensa erosión glacial y fluvial, suavizada localmente por el volcanismo cuaternario. Estructuras de dirección Noroeste definen varias cuencas ocupadas por lagos como el Pirehueico (590 m s.n.m., represado por lavas), Panguipulli y Riñihue, hacia el Noreste, Noroeste y Oeste del volcán, respectivamente, los cuales forman parte de la hoya superior del río Valdivia. En consecuencia, en el pie norte del CVMCH, el sistema de drenaje comprende los ríos que unen los mencionados lagos como el río Fui-Llanquihue y el río Enco, el primero de los cuales recibe las aguas del pequeño lago Neltume desde el norte y del estero Punahue desde el sur. Por su parte, el río Enco, antes de su desembocadura en el lago Riñihue, recibe las aguas del estero Pirinel y del río Blanco, que drenan el sector occidental del CVMCH y por los cuales han descendido tanto lavas recientes e históricas como lahares.

Hacia el este y sur del CVMCH, el sistema de drenaje comprende las hoyas de los ríos Blanco-Pillanleufú, Florín y Caunahue. El río Pillanleufú tiene una trayectoria rectilínea de dirección norte-sur, coincidente con una de las trazas principales de la Zona de Falla Liquiñe-Ofqui (ZFLO), recibe como tributarios a los ríos Mocho y Chico desde el flanco SE del CVMCH y vierte sus aguas en el lago Maihue. Los otros dos ríos drenan el flanco Sudoeste del CVMCH y se unen antes de evacuar las aguas en el lago Ranco.

El Complejo Volcánico Mocho-Choshuenco (CVMCH) está ubicado en la zona volcánica de los Andes del Sur (ZVS: 37°-46°S), cubre un área irregular de ca. 250 km² y alcanza un volumen aproximado de 100 km³. Su estructura forma un alineamiento volcánico NO-SE integrado por los estratovolcanes Mocho y Choshuenco. Su base presenta una altitud media de 740 m y su cima alcanza 2422 m s.n.m. En consecuencia, el edificio tiene una altura real de 1.700 m, lo que sobrepasa en unos 900 m la línea media de las cumbres de la zona. El CVMCH registra 5 erupciones históricas (Moreno y Lara 2007): la primera en 1759 y la última, la más violenta, en 1864. El edificio compuesto ancestral sufrió un colapso que generó la caldera, en cuya depresión se construyó el cono central del volcán Mocho. El estratovolcán Choshuenco fue afectado parcialmente también por el colapso y

forma el borde noroccidental de la depresión volcánica. Esta última estructura genera una morfología achatada, suavemente inclinada hacia el sur y elongada en dirección NO-SE, con 4,5 km de diámetro mayor. En su interior alberga un glaciar que alcanza actualmente una superficie de ca. 17 km².

3.5.6.1. **Clima**

El clima es principalmente templado lluvioso en la mayor parte del área estudiada y frío de altura en cotas superiores a los 2.000 m s.n.m. (Fuenzalida, 1965). Las precipitaciones superan 4.000 mm/año en los sectores más elevados y la isoterma cero se sitúa ligeramente sobre los 1.000 m.s.n.m. en la estación invernal. Las temperaturas medias en los valles alcanzan 16-17°C en el período estival y se reducen a 5-6°C en invierno. La **vegetación característica de la zona es la 'Selva Valdiviana Andina' (Fuenzalida, 1965).**

En la depresión intermedia se presenta el clima Templado Cálido Lluvioso, que se extiende hasta la isoterma invernal de 5°C. Las lluvias son elevadas y se presentan durante todo el año con bastante homogeneidad, registrándose en verano alrededor de un tercio del total.

En las zonas más altas de la cordillera se presenta un clima de Hielo por Efecto de Altura este corresponde a un clima de nieve perpetua sin vegetación con precipitaciones sobre los 3.000 mm al año y temperaturas bajo cero gran parte del año (Dirección Meteorológica de Chile, 2012 e INE, 2007).

Las temperaturas no se ven tan afectadas por el relieve así como las precipitaciones que aumentan de forma importante con la altitud y latitud (Dirección Meteorológica de Chile, 2012).

3.5.6.2. **Precipitaciones**

Las precipitaciones en la zona varían según la cercanía a la costa, la orientación y la topografía. Se analizaron las estaciones pluviométricas más cercanas al volcán, cuyas características se presentan en la Tabla 3.5.6.2-A. En la Fig. 3.5.6.2-A se presenta la ubicación de las estaciones pluviométricas seleccionadas.

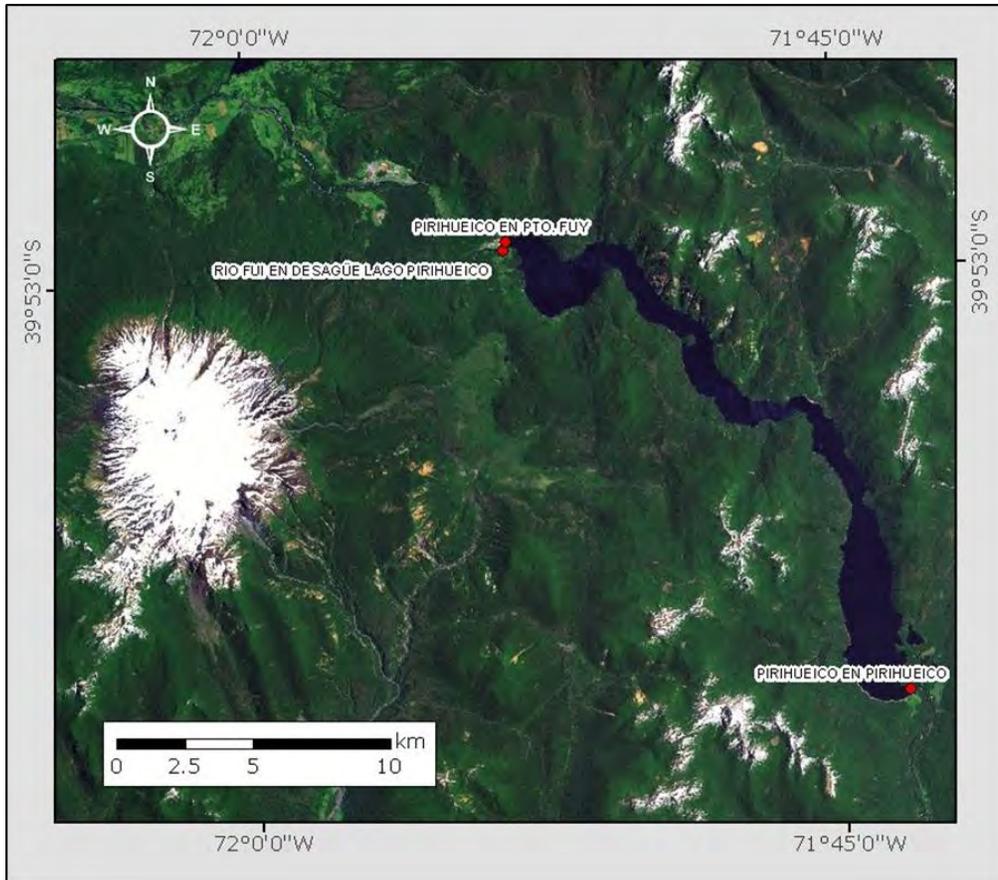


Fig. 3.5.6.2-A. Ubicación de las estaciones meteorológicas y pluviométricas.

Tabla 3.5.6.2-A. Características de las estaciones pluviométricas.

Estación	E (m)	N (m)	Cota (m s.n.m.)	Cuenca	Huso	Registro	Precipitación anual promedio (mm)
Río Fui en desagüe lago Pirihueico	252.853	5.582.074	600	Río Valdivia	19 Sur	2003-2012	2.690
Pirihueico en puerto Fui	252.915	5.582.384	600	Río Valdivia	19 Sur	2000-2012	3.799
Pirihueico en Pirihueico	267.706	5.566.119	600	Río Valdivia	19 Sur	1939-1963 1999-2012	2.461

El promedio de precipitaciones en la zona es de 2.983 mm al año, sin embargo todas las estaciones están a menos de 600 m.s.n.m. por lo que no son representativas de las

precipitación en altura, como es el caso del glaciar sobre el volcán Mocho-Choshuenco. La estación con mayor periodo de registro corresponde a la estación Pirihueico en Pirihueico que cuenta con un periodo de 40 años de datos, si bien no son continuos ya que faltan desde el año 1963 hasta 1999.

En la Fig. 3.5.6.2-B se muestra la variación a lo largo del año de las precipitaciones mensuales promedio de las tres estaciones. En este gráfico se puede observar que la precipitación se concentra entre los meses de mayo y agosto, de lo cual se deduce que la acumulación máxima de nieve se da a finales de invierno e inicios de primavera.

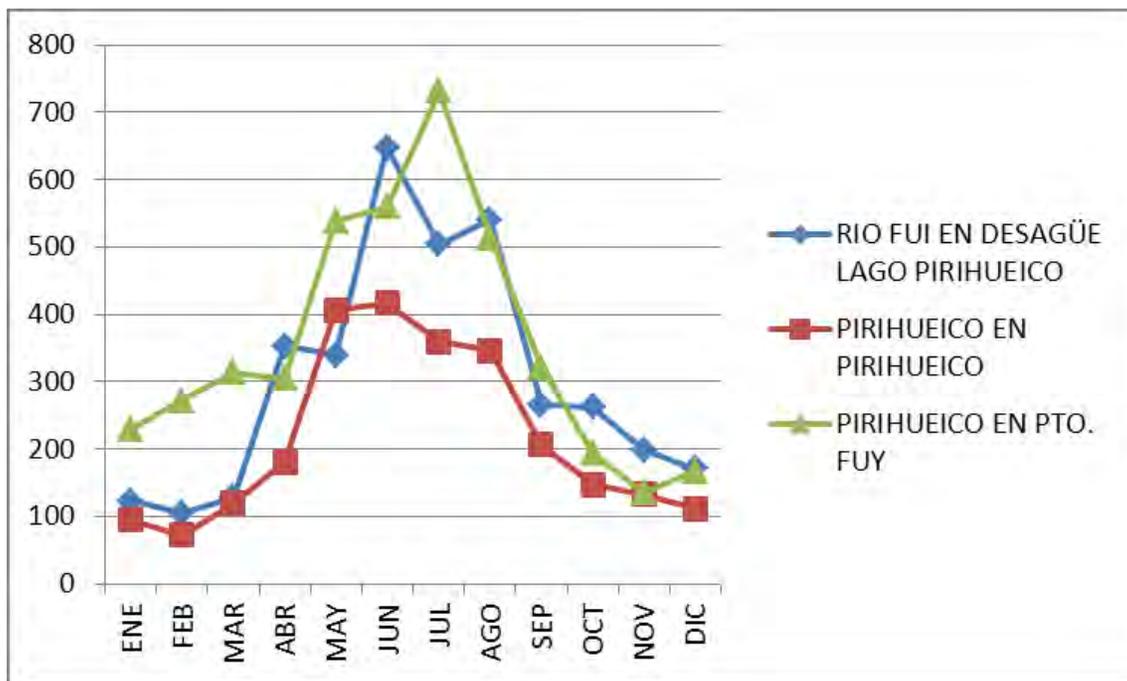


Fig. 3.5.6.2-B. Variación mensual de la precipitación.

3.5.6.3. **Datos meteorológicos glaciar Mocho**

Dentro de los estudios glaciológicos en el glaciar Mocho, en el año 2006 se instaló una estación meteorológica cerca del glaciar, a la cota 1995 m s.n.m. entre el 1 de febrero y el 29 de noviembre. Las mediciones fueron almacenadas cada 15 minutos de las siguientes variables meteorológicas: temperatura del aire, humedad relativa, radiación

neta y radiación directa. Las máximas y mínimas de la temperatura del aire, fueron almacenadas diariamente. Lamentablemente no se contó con datos de viento debido a falla en el anemómetro.

En las Figs. 3.5.6.3-A, B y C se muestran los datos de temperatura media mensual, la humedad relativa media mensual y la radiación directa mensual en la estación meteorológica.

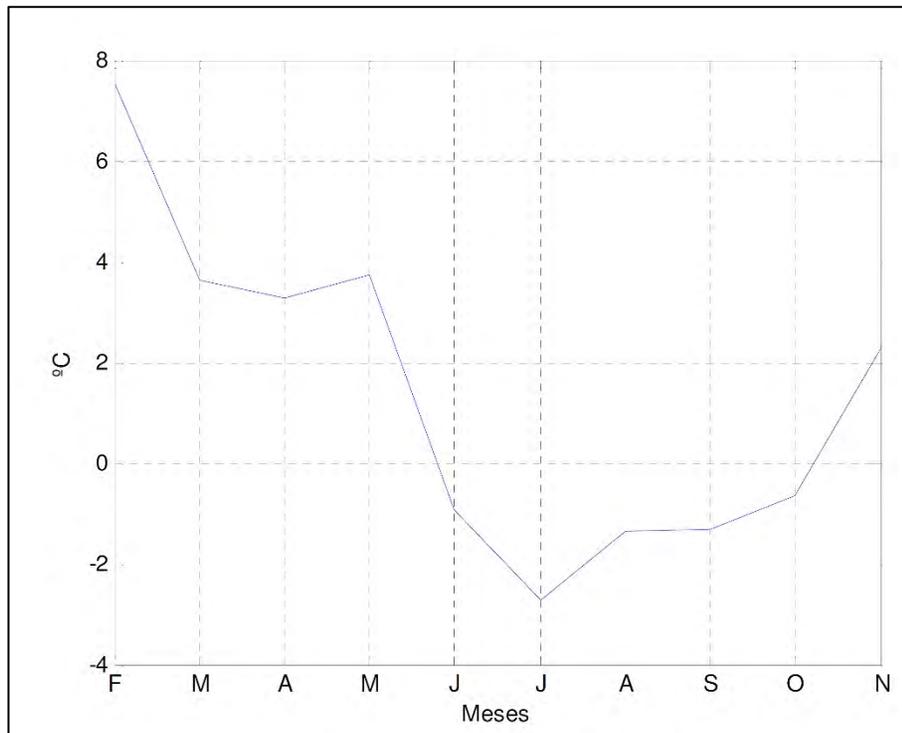


Fig. 3.5.6.3-A. Temperatura media mensual, volcán Mocho- Choshuenco 2006 (fuente: Escobar, tesis doctoral).

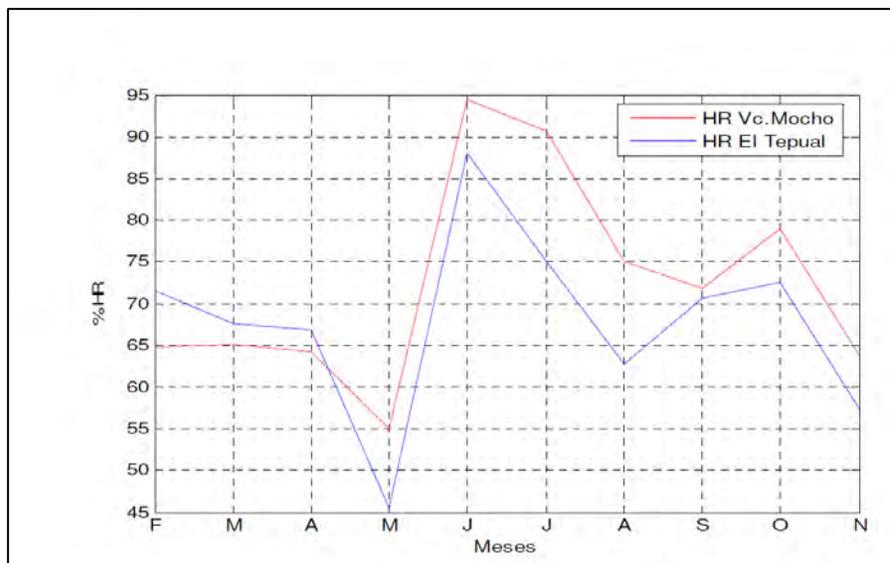


Fig. 3.5.6.3-B. Medias mensuales de Humedad Relativa, volcán Mocho-Choshuenco (rojo) v/s El Tepual (radiosonda de Puerto Montt) (azul), febrero a noviembre 2006 (fuente: Escobar, tesis doctoral).

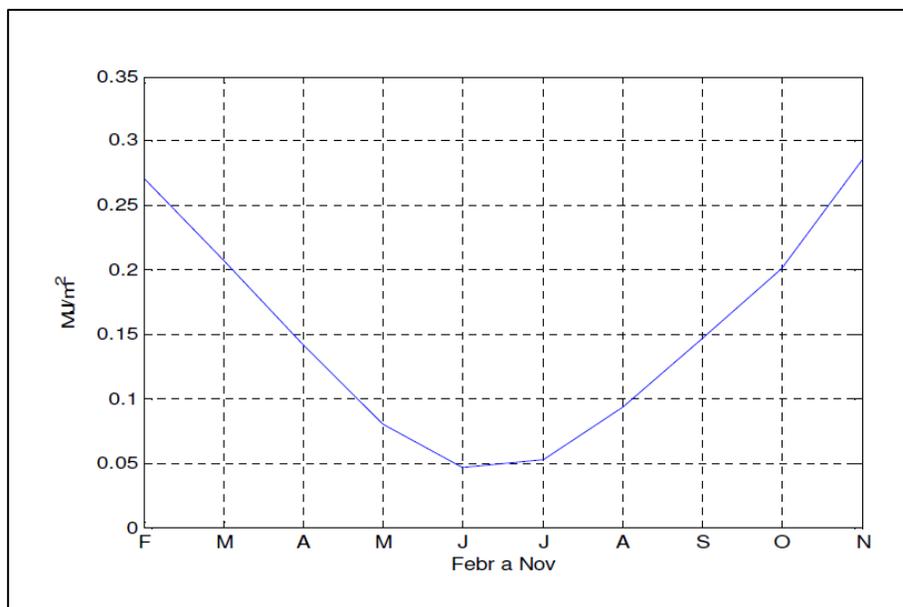


Fig. 3.5.6.3-C. Radiación directa, media mensual (MJ/m²), volcán Mocho-Choshuenco 2006 (fuente: Escobar, tesis doctoral).

En todos los gráficos se constatan condiciones climáticas asociadas a precipitaciones en los meses de invierno, preferentemente en forma de nieve: descenso de la temperatura, aumento de la humedad relativa y descenso de la radiación directa.

3.5.6.4. **Contexto Geológico**

“La información que se reproduce en “contexto geológico” ha sido extraída del mapa geológico del volcán Mocho-Choshuenco realizado por Moreno y Lara (2007).

Desde el punto de vista geológico, el CVMCH se sitúa en la provincia central de los Andes del Sur (37°-42°S; López-Escobar et al., 1995). Este segmento se emplaza en un sector del margen sudamericano, donde la placa de Nazca se desplaza hacia el este con una dirección N79°E y una velocidad de 7,9 cm/año (DeMets et al., 1994). En este mismo lugar, la losa oceánica se introduce con un ángulo aproximado de 30° (Cahill e Isaaks, 1992) bajo la placa Sudamericana, cuya corteza alcanza un espesor de 38-40 km a esta latitud (Bohm et al., 2002). El CVMCH consiste en una estructura compuesta, formada por un estratovolcán ancestral principal y un edificio adyacente (Choshuenco). El estratovolcán principal sufrió un colapso que afectó también, parcialmente, el volcán Choshuenco, en cuya depresión caldérica se encuentra un cono central (Mocho). En consecuencia, el CVMCH consta de dos cimas, de las cuales el volcán Mocho alcanza la mayor elevación con 2422 m s.n.m. y unos 1.700 m sobre su base. En las Figs. 3.5.6.5.1-A y B se muestra el mapa geológico del volcán de Moreno y Lara (2007) y su leyenda.

3.5.6.5. **Basamento de los volcanes del Pleistoceno-Holoceno**

3.5.6.5.1 Rocas Estratificadas y metamórficas

Complejo metamórfico Trafún – Pzt (Devónico-Carbonífero) (Campos et al., 1998)

Unidad expuesta en el margen occidental y suroccidental del CVMCH, cuyos afloramientos restringidos se encuentran al sur de Enco (lago Riñihue) y en el valle del río Caunahue. Esta unidad está constituida por metaareniscas, cuarcitas, pizarras y filitas verdes. Inicialmente reconocidas por Illies (1960, 1970), quien las denominó Estratos de Trafún, estas rocas fueron asignadas por González-Bonorino (1970) a las Zonas I y II de la denominada Serie Curepto e incluidas por Aguirre et al. (1972) dentro de la Serie Oriental del Basamento Metamórfico de la Costa de Chile central-sur. El reducido afloramiento,

ubicado al sur de Enco, subyace a una cornisa de lavas pleistocenas del CVMCH, muestra foliación de disposición NS/75°E con esquistocidad planar milimétrica y está intruido por el Plutón Panguipulli (Jg). A su vez, en el río Caunahue, las metaareniscas silicificadas se presentan con una estratificación aparente N15°E/53E. Fuera del área del mapa, la edad máxima de esta unidad ha sido acotada en ca. 383 Ma, edad de los circones detríticos contenidos en conglomerados asignados a este complejo (Campos et al., 1998). A su vez, la edad mínima queda restringida por la del Batolito Futrono-Riñihue (ca. 300 Ma) que intruye a esta unidad. En el sector de Enco, el Complejo Metamórfico Trafún subyacería en discordancia a los estratos de la Formación Panguipulli, asignada al Triásico Superior (Herbst et al., 2005).

Formación Panguipulli – Trp (Triásico superior) (Rodríguez et al., 1999; emend. Aguirre y Levi, 1964)

Secuencia rítmica de areniscas, lutitas, cuarcitas y conglomerados cuarcíferos, reconocida principalmente en las riberas de los lagos Calafquén y Panguipulli y en el extremo suroriental del lago Riñihue. En el sector noroccidental del área de estudio, aflora como una sucesión estratificada fuertemente plegada, de base desconocida, intruida por cuerpos plutónicos mesozoicos (Jg, Kg) o pórfidos miocenos (Mp) y cubierta por rocas estratificadas oligoceno-miocenas de los Estratos de Lago Ranco (OMlr). Relaciones de campo sugieren una posición discordante de esta unidad sobre rocas del Complejo Metamórfico Trafún (Pzt). En el sector del estero La Turbina, las lutitas y areniscas aparecen intensamente plegadas y, localmente, presentan rasgos de metamorfismo de contacto. Al norte del área de estudio, la flora fósil recolectada en esta unidad correspondería al Cárnico Superior-Nórico (Herbst et al., 2005).

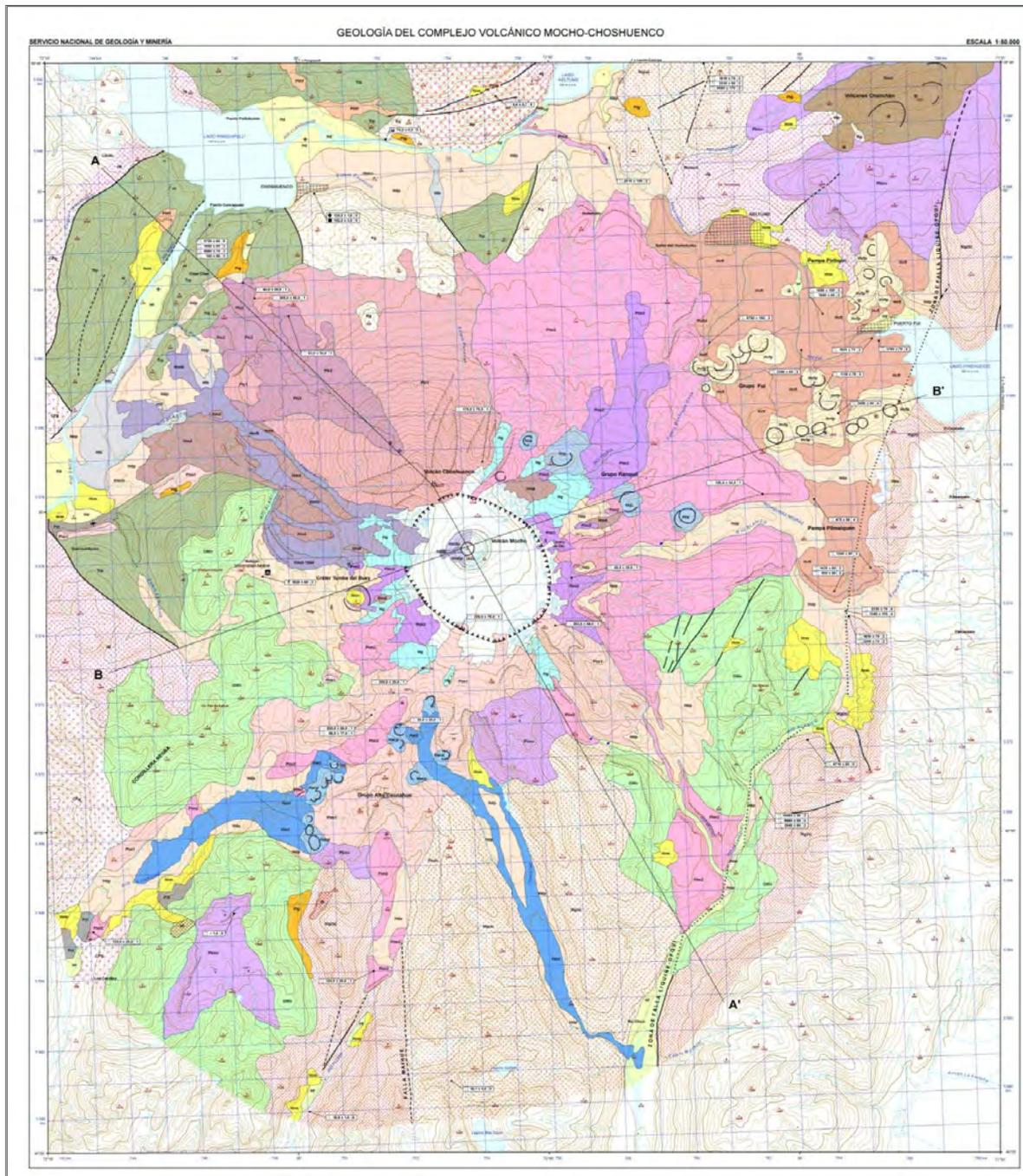


Fig. 3.5.6.5.1-A. Mapa geológico del complejo volcánico Mocho-Choshuenco (Moreno y Lara, 2007).

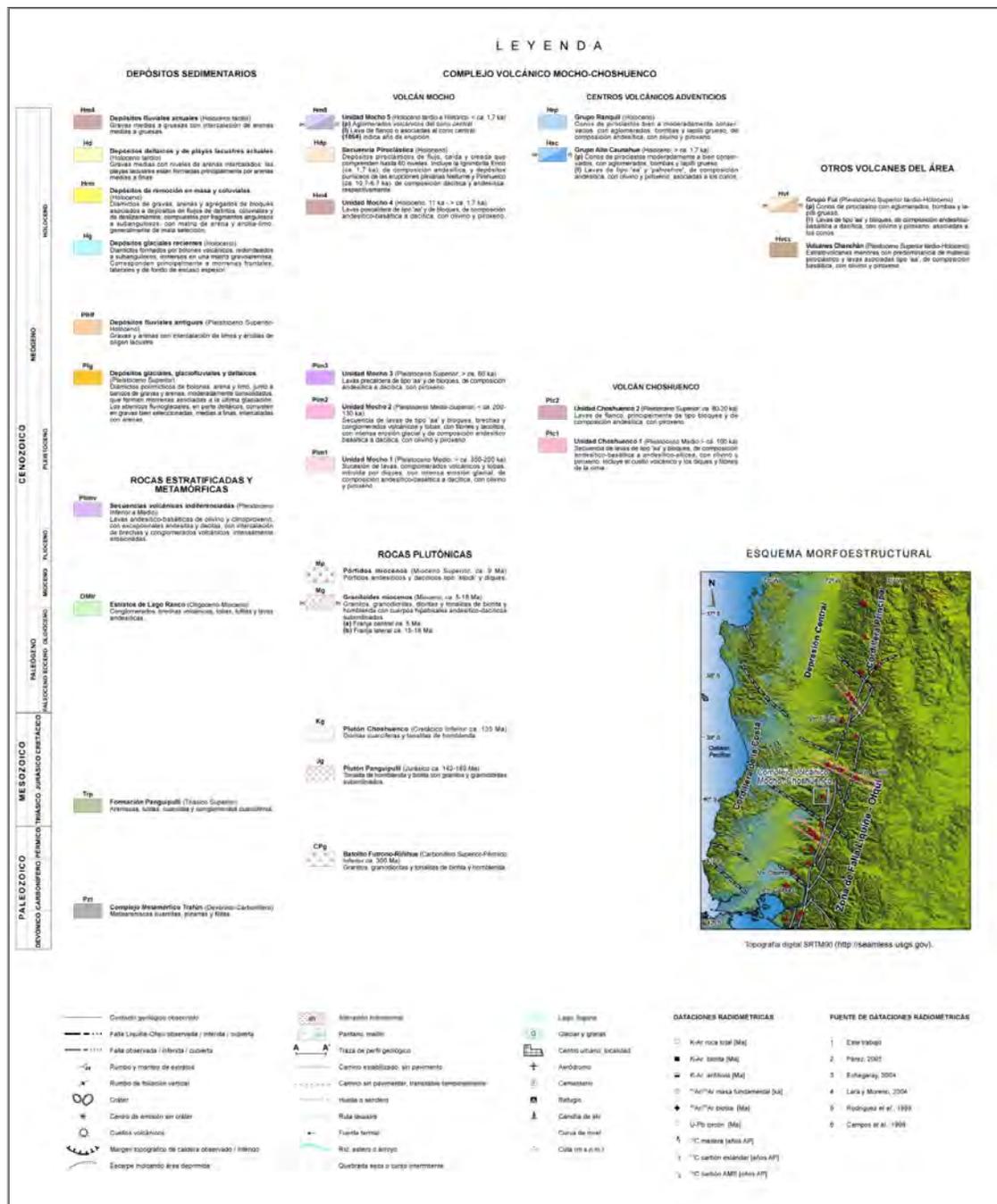


Fig. 3.5.6.5.1-B. Leyenda de la Fig. 3.5.6.5.1-A.

Estratos del lago Ranco – OMr (Oligoceno-Mioceno) (Campos et al., 1998)

Secuencia volcanosedimentaria plegada, compuesta por conglomerados, brechas volcánicas, tobas, tufas y lavas andesíticas porfídicas, de color gris verde, que alcanza

hasta 1.000 m de espesor en la localidad tipo, ribera sur del lago Ranco, donde incluye, además, rocas sedimentarias marinas con fauna fósil miocena (Campos et al., 1998). En el sector occidental del área de estudio, esta unidad cubre discordantemente las unidades mesozoicas, en tanto que al oriente, las capas presentan metamorfismo de contacto y se **encuentran como 'roof-pendants' entre dos franjas de intrusivos miocenos, limitadas por** estructuras de la ZFLO. Fuera del área de estudio, García et al. (1988) reportaron edades de ca. 13 Ma (K-Ar en roca total) para rocas volcánicas e hipabisales de esa secuencia, mientras que Campos et al. (1998) informaron una edad de ca. 20 Ma (K-Ar en plagioclasa) para estratos volcánicos equivalentes, sin descartar que la base de la secuencia alcance edades oligocenas.

Secuencias volcánicas indiferenciadas – Plimv (Pleistoceno Inferior a Medio) (*Lara y Moreno, 2004*)

Rocas volcánicas estratificadas subhorizontales aisladas, que se distribuyen en una franja transversal NE-SO y forman relieves amesetados. Comprenden, principalmente, lavas andesítico-basálticas de olivino y clinopiroxeno, junto a escasas andesitas y dacitas (53-66% SiO₂) ocasionalmente desvitrificadas y con algunas intercalaciones de brechas y conglomerados volcánicos. Corresponden a remanentes de antiguos estratovolcanes intensamente desgastados por la erosión glacial. Descansan en discordancia tanto sobre rocas plutónicas jurásicas (Jg) e intrusivos miocenos (Mga, Mgb, Mp) como sobre los Estratos de Lago Ranco (OMlr). A su vez, estas secuencias están cubiertas, localmente, por productos volcánicos del Pleistoceno tardío a Holoceno de los grupos Fui y Chanchán, en el extremo nororiental del área de estudio. Una lava del sector SO arrojó un valor K-Ar (roca total) menor que 1,0 Ma (Campos et al., 1998) que sostiene su asignación al Pleistoceno Inferior a Medio. Secuencias equivalentes fueron incorporadas dentro de los **denominados 'Estratovolcanes antiguos y meseta oriental' en el área de Liquiñe-Neltume** por Lara y Moreno (2004), unidad asignada, en principio, al Plioceno Superior-Pleistoceno Inferior. En áreas vecinas, hacia el este del área de estudio, Lara et al. (2001) y Lara y Moreno (2004) han reportado edades K-Ar generalmente menores a 1,5 Ma. Lara y Folguera (2006) refinaron estos resultados y obtuvieron edades ⁴⁰Ar/³⁹Ar (masa fundamental) del Pleistoceno Medio (ca. 0,6-0,7 Ma) para secuencias volcánicas equivalentes, situadas en la zona fronteriza a similar latitud.

3.5.6.5.2 Rocas plutónicas

Batolito Futrono-Riñihue – Cpg (Carbonífero Superior-Pérmico inferior) (Campos et al., 1998)

Unidad plutónica constituida por granitos, granodioritas y tonalitas de biotita y hornblenda, de carácter metaluminoso a peraluminoso, que se extiende regionalmente entre los lagos Calafquén y Ranco. En el área de estudio, esta unidad aflora en el sector occidental, al oeste del río Enco, donde está en contacto por fallas con rocas de la Formación Panguipulli y en el valle del río Caunahue, donde intruye al Complejo Metamórfico Trafún (Pzt) y subyace a capas oligoceno-miocenas de los Estratos de Lago Ranco (OMlr). Además, está intruida por el Plutón Panguipulli de edad jurásica (Jg). Fuera del área de estudio, edades K-Ar y $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ de ca. 282-307 Ma fueron reportadas por Munizaga et al. (1988), Beck et al. (1991), Campos et al. (1998) y Rodríguez et al. (1999). Por otra parte, las edades U-Pb (circones) de cristalización de esta unidad definen un intervalo concordante entre ca. 282-304 Ma (Campos et al., 1998).

Plutón Panguipulli – Jg (Jurásico) (Rodríguez et al., 1999)

Unidad plutónica que forma una franja de orientación NO-SE entre los lagos Panguipulli, Riñihue y Pirehueico, y que se extiende incluso al territorio argentino (Rapela y Pankhurst, 1992; Lara y Moreno, 2004). En el área de estudio, Rodríguez et al. (1999) denominaron Plutón Panguipulli la unidad expuesta en las riberas del lago homónimo y como Plutón Huechulafquén la reconocida en la ribera sur del lago Riñihue. Hacia el este, Lara y Moreno (2004) designaron como Tonalitas de Pirehueico-Neltume la porción oriental de esta franja reconocida en las riberas del lago Pirehueico. La litología dominante es la tonalita de hornblenda y biotita, aunque en el lago Panguipulli predominan los granitos y, en menor proporción, las granodioritas. En el sector occidental del área de estudio, el Plutón Panguipulli intruye rocas paleozoicas del Complejo Metamórfico Trafún (Pzt), granitoides del Batolito Futrono-Riñihue (CPg) y rocas plegadas de la Formación Panguipulli (Trp); mientras en el extremo norte, está intruido por el Plutón Choshuenco del Cretácico Inferior (Kg) y por granitoides y pórfidos miocenos (Mga; Mp). De acuerdo a su exposición, los granitoides de esta franja formarían cuerpos plutónicos tabulares subhorizontales, seccionados por los intrusivos del Cretácico y Mioceno y cubiertos por las unidades volcánicas y sedimentarias cenozoicas. Edades de enfriamiento K-Ar y $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ entre ca. 142-184 Ma han sido reportadas para esta unidad por Munizaga et al. (1988), Rodríguez et al. (1999) y Lara y Moreno (2004). Además, Rodríguez et al. (1999) obtuvieron una edad de ca. 176 Ma (U-Pb en circones) en

granitos del lago Panguipulli, interpretada como de cristalización.

Plutón Choshuenco – Kg (Cretácico Inferior) (Rodríguez et al., 1999)

Cuerpo intrusivo localizado al sur y este de la localidad de Choshuenco, constituido principalmente por dioritas cuarcíferas y tonalitas de hornblenda, de grano medio a grueso. En la ladera sur del valle del río Llanquihue, el plutón se presenta en contacto por fallas con la Formación Panguipulli (Trp), mientras que en la ribera norte, el contacto es por intrusión. En este último sector, los granitoides cretácicos están cortados por cuerpos porfídicos miocenos (Mp) y hacia el sur, estas rocas están cubiertas por materiales volcánicos del CVMCH. En una diorita cuarcífera al sur de la localidad de Choshuenco, Rodríguez et al. (1999) obtuvieron edades de enfriamiento de ca. 142 Ma (K-Ar en biotita) y ca. 134 Ma ($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ plateau en biotita); mientras que al norte del río Llanquihue, una edad K-Ar en anfíbola de una tonalita, arrojó un valor de 74 ± 8 Ma, interpretada como mínima debido a su proximidad con el cuerpo porfídico del Mioceno Superior (Mp; $9,6 \pm 0,7$ Ma). Al sur del área de estudio y a similar longitud, Campos et al. (1998) reportaron una edad de ca. 120 Ma (U-Pb en circones) para el Plutón Lago Maihue, interpretado como un enclave en la franja norte-sur de plutones miocenos. A esta latitud, pero al este de la ZFLO, Lara y Moreno (2004) describen una franja longitudinal bien desarrollada de granitoides cretácicos, con edades de enfriamiento K-Ar entre ca. 135 y 94 Ma.

Granitoides Miocenos – Mga, Mgb (Mioceno) (Campos et al., 1998; Rodríguez et al., 1999; Lara y Moreno, 2004)

Cuerpos intrusivos dispuestos en franjas longitudinales de orientación NNE y limitadas por la traza principal de la ZFLO o algunas estructuras subsidiarias de ella. Las litologías reconocidas incluyen desde granitos y granodioritas a dioritas y tonalitas de biotita y hornblenda, además de cuerpos hipabisales andesítico-dacíticos subordinados. Los granitoides miocenos intruyen los plutones paleozoicos y mesozoicos, como también rocas de los Estratos de Lago Ranco (OMlr, Oligoceno-Mioceno). Las franjas occidental y oriental (Mgb) incluyen parte del Granito Liquiñe de Lara y Moreno (2004), con edades de ca. 14-15 Ma (K-Ar en biotita) y la franja central (Mga), parte de los Granitoides Pellaifa-Neltume de Lara y Moreno (2004). Para estos últimos, Munizaga et al. (1988) y Lara y Moreno (2004) reportaron edades K-Ar de ca. 6-8 Ma mientras que una edad $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ de $5,77 \pm 0,15$ Ma en biotita fue obtenida por los últimos autores al este del lago Pellaifa. En la misma franja central, al sur del área de estudio, Campos et al. (1998) obtuvieron una

edad de ca. 5 Ma (U-Pb en circones), interpretada como edad de cristalización. Al sur del CVMCH y al oeste de la Falla Maihue, afloran granodioritas para las cuales Campos et al. (1998) obtuvieron una edad U-Pb (circones) de 15 ± 1 Ma. En la franja central más joven (Mga), una edad K-Ar (roca total) de ca. 18 Ma (Campos et al., 1998) resulta discordante con los valores obtenidos mediante U-Pb y $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ y se interpreta como asociada a un enclave de los granitoides que forman las franjas laterales.

Pórfidos miocenos – Mp (Mioceno Superior) (Rodríguez et al., 1999; Lara y Moreno, 2004)

Conjunto de intrusivos porfídicos que afloran en el extremo norte del área de estudio, al oeste del lago Neltume, y, subordinadamente, en dos sectores al oeste de los volcanes Chanchán. Corresponden a cuerpos tipo 'stock' con diques asociados, de composición andesítica a dacítica, algunos de los cuales han sido datados por Rodríguez et al. (1999) en ca. 9 Ma (K-Ar en roca total). Estos cuerpos hipabisales intruyen tanto granitoides del Plutón Panguipulli (Jg, Jurásico) y del Plutón Choshuenco (Kg, Cretácico Inferior) como rocas de la Formación Panguipulli (Trp, Triásico Superior).

3.5.6.6. **Geología de los volcanes del Pleistoceno-Holoceno**

El CVMCH es un conjunto volcánico de orientación NO-SE integrado por los volcanes Choshuenco y Mocho, además de una serie de centros eruptivos menores situados en sus flancos. Sus productos representan episodios volcánicos ocurridos desde el Pleistoceno Medio hasta el presente. Morfoestructuralmente, consiste en una estructura compuesta, formada por un edificio antiguo principal (Mocho ancestral) y un estratovolcán contiguo (volcán Choshuenco). El edificio ancestral sufrió un colapso que afectó parcialmente también al volcán Choshuenco y generó una caldera elíptica, en cuyo interior se construyó un cono central (volcán Mocho actual). La caldera es una depresión elongada en dirección NO-SE con ejes de 4,5 y 3,5 km de longitud, respectivamente, y en su interior alberga un glaciar que alcanza una superficie actual de ca. 17 km^2 (Rivera et al., 2005). En medio de la caldera, se eleva el cono del Mocho con una base de 1.250 m de diámetro y una altura de 220 m sobre el glaciar. En su cima presenta un cráter circular de 400 m de diámetro y corresponde a la mayor altitud del complejo, con 2422 m s.n.m. El volcán Choshuenco se alza en el margen NO de la caldera, el cual corresponde al remanente erosionado del edificio compuesto, y su cima consiste en un cuello volcánico que alcanza 2415 m.s.n.m. En su conjunto, el CVMCH cubre una superficie irregular de, aproximadamente, 250 km^2 y alcanza un volumen del orden de 100 km^3 . Su cima principal se eleva unos 900 m por

sobre la línea media de cumbres de la zona y 1.700 m sobre su base, la cual posee un promedio de altura de 740 m. El desnivel mayor (2.300 m) se produce en la ladera NO del volcán Choshuenco donde, a sus pies, se ubica el río Enco a solo 120 m s.n.m.

Sobre la base de criterios morfológicos, relaciones de campo y geocronología $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ se ha establecido una sucesión relativa de unidades para cada centro emisor, manteniendo una metodología común en áreas profundamente erosionadas de los Andes del Sur (e.g., Lara, 2004; Naranjo y Moreno, 2005; Moreno y Clavero, 2006; Lara y Moreno, 2006). Además, la estratigrafía de los depósitos piroclásticos holocenos se ha complementado con edades ^{14}C disponibles para ellos, tanto en sus facies proximales como distales, reconocidas fuera del área de estudio. Como resultado, se han definido varias unidades evolutivas para cada centro emisor, además de una secuencia piroclástica holocena asociada, principalmente, a erupciones ocurridas tanto en centros eruptivos del interior de la caldera como en el volcán Mocho. De esta forma, en el edificio Mocho ancestral se pudieron definir tres unidades evolutivas mientras que para la etapa postcaldera se definieron dos, siendo el actual cono Mocho y sus derrames lávicos la unidad más reciente. Por su parte, en el volcán Choshuenco, se pudieron definir dos unidades, la primera de las cuales engrana con las secuencias superiores precaldera del edificio ancestral Mocho. Además, se ha reconocido una veintena de centros adventicios, organizados en dos grupos ubicados en los flancos nororiental y suroccidental del CVMCH.

3.5.6.6.1 Volcán Mocho

Estructura volcánica que incluye un edificio ancestral, que presenta una caldera de colapso y el cono holoceno Mocho que se edificó en su interior. Tanto el estratovolcán ancestral como su cono actual tienen, en conjunto, un volumen de ca. 80 km^3 y sus productos cubren una superficie de ca. 200 km^2 . El edificio ancestral podría haber alcanzado un volumen cercano a 135 km^3 antes de su colapso, el cual se habría producido después de ca. 60 ka, y su reconstrucción se habría reiniciado con el crecimiento del cono central en el Holoceno tardío. Entre sus productos, predominan las andesitas, aunque la composición se extiende en el intervalo de 52 a 68% SiO_2 . La actividad volcánica en este centro ha ocurrido desde el Pleistoceno Medio hasta tiempos históricos.

Unidad Mocho 1 – Plm1 (Pleistoceno Medio) (>ca. 350-200 ka)

Sucesión de lavas, conglomerados volcánicos y tobas, con suave manto radial hacia el

SO y SE dispuesta, predominantemente, en la sección sur del complejo volcánico y que constituye la secuencia más antigua del edificio volcánico. Presenta intensa erosión glacial y alcanza espesores de hasta 750 m. Está constituida principalmente por lavas andesítico-basálticas a andesíticas de olivino y piroxeno (52-59% SiO₂), de 10 a 30 m de espesor, con abundantes intercalaciones de conglomerados volcánicos y algunas tobas. En algunos sectores, diques andesítico-basálticos y dacíticos de olivino y piroxeno (55-65% SiO₂) cortan la secuencia principal o alimentan coladas menores.

Aunque la edad máxima de esta unidad es desconocida, puede considerarse, en parte, equivalente a la edad mínima de las Secuencias Volcánicas Indiferenciadas (Plimv) del Pleistoceno Inferior a Medio, ampliamente distribuidas en la región (Lara et al., 2001; Lara y Moreno, 2004; Lara y Folguera, 2006), las cuales forman parte del basamento del complejo volcánico. Localmente, coladas de la unidad Mocho 1 se adosan a ella. En una lava andesítica de la secuencia Plm1 en el flanco sur, se obtuvo una edad ⁴⁰Ar/³⁹Ar 'plateau' en masa fundamental de 350±20 ka, la cual corresponde a la edad más antigua determinada en esta unidad. Aunque el afloramiento se encuentra en un nivel topográficamente elevado, se interpreta como un remanente de lavas basales de esta secuencia. A menor altura, aunque en una posición estratigráfica superior, otra lava andesítica fue datada en 260±60 ka por igual método. A su vez, esta aparece intruida por un dique andesítico datado en 86±17 ka. Edades ⁴⁰Ar/³⁹Ar 'plateau' en masa fundamental de 220±78 y 202±54 ka, respectivamente, se obtuvieron para coladas andesíticas, intercaladas en conglomerados volcánicos del techo de la secuencia. Estas lavas están expuestas en los prominentes escarpes del flanco sur, los cuales definen la pared de la caldera.

Unidad Mocho 2 – Plm2 (Pleistoceno Medio-Superior) (>ca. 200-130 ka)

Sucesión de lavas con intercalaciones volcanoclásticas, en especial tobas y brechas, además de conglomerados volcánicos, con inyecciones filoneanas y lacolíticas. Esta unidad presenta suave manteo radial divergente y está expuesta preferentemente en los flancos oriental y nororiental del complejo volcánico, donde forma gran parte de la secuencia precaldera del edificio volcánico. En el flanco oriental, cerca del centro de ski, esta secuencia alcanza ca. 500 m de espesor y se reconocen tres subunidades sucesivas. La subunidad inferior comprende lavas con espesores entre 20 y 40 m (>100 m de espesor). La sobreyace una intermedia, formada en su mayoría por brechas volcánicas gruesas y tobas (ca. 200 m de espesor). Esta subunidad está cubierta, a su vez, por un

paquete de lavas con espesores entre 5 y 40 m, de tipo 'aa' y bloques, profusamente intruida por diques y un extenso cuerpo lacolítico (ca. 200 m de espesor).

Forman parte de esta unidad, coladas aisladas dispuestas en los flancos distales del edificio principal, en los valles de los ríos Caunahue, Florín y Pillanleufú en el sector sur del complejo. Estas últimas habrían sido emitidas desde centros eruptivos de flanco. La unidad presenta intensa erosión glacial, alcanza localmente espesores superiores a 600 m y está constituida por andesitas basálticas a dacitas de olivino y piroxeno (52-68% SiO₂). La edad máxima de esta unidad es desconocida, aunque ella puede acotarse con la edad mínima de ca. 200 ka obtenida para la secuencia Plm1 precedente, a la cual localmente recubre o se adosa. En una lava andesítica cercana al techo de la secuencia sobre el flanco oriental, se obtuvo una edad ⁴⁰Ar/³⁹Ar 'plateau' **en masa fundamental de 130±30 ka.** Edades concordantes de 130±20 y 130±30 ka se obtuvieron por igual método en coladas andesíticas distales de flanco ubicadas en los valles de los ríos Caunahue y Florín.

Unidad Mocho 3 – Plm3 (Pleistoceno Superior) (>ca. 60 ka)

Conjunto de lavas con suave manteo radial divergente, expuesto principalmente en la periferia de la caldera, en los sectores nororiental y suroccidental y que forma la sucesión estratificada terminal de la secuencia precaldera del complejo volcánico. Estas coladas rellenan, parcialmente, valles del flanco alto del edificio principal, labrados en la unidad Plm2 y corresponden a andesitas y dacitas de piroxeno (56-66% SiO₂), localmente con texturas de mezcla. Las lavas más extensas del flanco NE alcanzan una longitud de 8 km, **son de tipo 'aa' y de bloques, con formas lobuladas y espesores de varias decenas de metros. En la parte alta, las lavas presentan fracturamiento tipo 'hackle joints' que** indicaría emplazamiento bajo cuerpos de hielo (e.g., Lescinsky y Finks, 2000), además de intensa erosión glacial de superficie. Están cubiertas por depósitos morrénicos recientes, asociados a los lóbulos del glaciar en retroceso.

La edad máxima de esta unidad es desconocida, aunque de acuerdo a las edades mínimas de las unidades precedentes se puede considerar como enteramente intraglacial. En efecto, una dacita de piroxeno del flanco oriental fue datada en 60±20 ka (⁴⁰Ar/³⁹Ar 'plateau' **en masa fundamental**). **Con posterioridad a esta unidad, el estratovolcán ancestral habría sufrido el colapso del edificio y se habría generado la caldera.** Esta etapa habría ocurrido aún durante la última glaciación (>ca. 14 ka) y, en consecuencia, los

depósitos piroclásticos asociados al colapso se habrían emplazado, tanto sobre el hielo en las áreas distales como dentro de la depresión caldérica. Así, es probable que gran parte de estos depósitos resultaran removidos en el posglacial, posiblemente conservándose ellos solo en el interior de la caldera y en sectores lejanos hacia el oeste del complejo volcánico, fuera del dominio de los glaciares.

Unidad Mocho 4 – Hm4 (Holoceno) (11 ka - >ca. 1,7 ka)

Conjunto de lavas expuesto, principalmente, en el sector occidental y en algunos lugares altos del flanco oriental del complejo volcánico. Forma parte de la secuencia de coladas poscaldera emitidas, tanto desde centros de emisión en el interior de la caldera como desde los flancos a través de pequeñas fisuras. Además, representarían la primera etapa **de construcción del cono moderno. Corresponden principalmente a coladas de tipo 'aa'** andesítico-basálticas (52-55% SiO₂) y lavas de bloque andesítico silíceas a dacíticas, con formas lobuladas y espesores de hasta 25 m, (60-67% SiO₂) sin rasgos de erosión glacial. Esta unidad, de edad general <ca. 11,0 ka por ser completamente posglacial, engrana con gran parte de la Secuencia Piroclástica (Hdp, ver más adelante) dispuesta en los faldeos del volcán y las áreas distales, cuya edad máxima corresponde a un depósito de flujo piroclástico datado en ca. 10,7 ka (Pérez, 2005). La edad mínima, a su vez, deriva de la presencia de secuencias piroclásticas que contienen a la Ignimbrita Enco, datada mediante ¹⁴C en ca. 1,7 ka (Echegaray, 2004), que cubren o se adosan a las lavas holocenas de esta unidad.

Unidad Mocho 5 – Hm5l, Hm5l 1864, Hm5p, Hm5lh (Holoceno tardío e histórico.) (<ca. 1,7 ka)

Conjunto de lavas que representan las emisiones más recientes del CVMCH, aglomerados volcánicos que forman, particularmente, el cono central volcán Mocho y depósitos laháricos asociados. Los derrames de lavas corresponden principalmente a coladas de tipo **'aa' y de bloques, de composición andesítica a dacítica (57-64% SiO₂)**. Se distingue entre lavas indiferenciadas emitidas desde el volcán Mocho o desde centros emisores de flanco (Hm5l) y los aglomerados volcánicos que forman el volcán Mocho (Hm5p). Esta unidad incluye sus lavas asociadas y una colada dacítica de bloques, que alcanza una longitud de 4 km, con un espesor medio de 30 m, emitida desde un centro eruptivo lateral ubicado en el flanco occidental, inmediatamente al norte del cráter Tumba del Buey, extruida durante la erupción histórica del año 1864 (Hm5l 1864). Este conjunto comprende, además, depósitos laháricos (Hm5lh), no consolidados, con abundantes fragmentos tamaño grava,

mal seleccionados y ricos en matriz arenosa. Ellos constituyen el extenso relleno de superficie plana en el sector de Enco, en el valle del río homónimo, y se les reconoce también en el valle del estero Punahue, donde este último descarga en el valle del río Llanquihue. Posiblemente, gran parte de los depósitos laháricos de los sectores de Enco y estero Punahue se habrían originado durante la erupción de 1864. Las coladas **indiferenciadas presentan una longitud de hasta 11 km y son de tipo 'aa' en los sectores proximales**, variando a lavas de bloques hacia los extremos distales, con frentes de hasta 20 m de espesor.

Por otra parte, en el flanco occidental del CVMCH se reconoce el cráter de explosión tipo maar Tumba del Buey, de 750 m de diámetro, que corta rocas de la unidad Plm3 y la Ignimbrita Enco (ca. 1,7 ka). No se reconocen depósitos asociados a su formación y su interior está relleno solo con depósitos de flujos de detritos, procedentes de la remoción de materiales de la Ignimbrita Enco. La edad máxima de la unidad Hm5 se infiere a partir de la ausencia de depósitos de la Ignimbrita Enco sobre las coladas holocenas indiferenciadas. En efecto, las coladas más antiguas de esta unidad presentan, localmente, solo una delgada cubierta de piroclastos que corresponde a la parte superior de la secuencia piroclástica holocena (Hdp).

Secuencia piroclástica – Hdp (Holoceno)

Secuencia estratificada que comprende depósitos piroclásticos de flujo, caída y oleada, producto de erupciones explosivas holocenas ocurridas en uno o más centros de emisión ubicados dentro de la caldera y, los más recientes, asociados al cono central del volcán Mocho. Entre ellos destacan los depósitos de flujos y oleadas piroclásticas prehistóricas recientes e históricas (1864 DC) que poseen fragmentos de cerámica. La secuencia incluye también algunos niveles, preferentemente de caída, que proceden de otros centros eruptivos aledaños, como los conos de escoria del Grupo Fui. La parte superior de la secuencia podría incluir depósitos de caída asociados a la formación del maar Tumba del Buey, cuyo perímetro corta depósitos piroclásticos de la Ignimbrita Enco. En conjunto, representan cerca de 11.000 años de actividad eruptiva explosiva posglacial. Esta sucesión se distribuye ampliamente sobre los flancos del CVMCH y, hacia el oriente, descansa sobre rocas del basamento con espesores de hasta 14 m. En las facies distales, se distingue la alternancia de hasta 60 niveles, con delgados horizontes de paleosuelo entre algunos de ellos.

Sobre los flancos del CVMCH afloran las unidades más recientes, que rellenan el fondo de

los valles que descienden del edificio volcánico. Los depósitos de caída se distribuyen principalmente hacia el Este, SE y Norte de acuerdo al control de los vientos dominantes durante las respectivas erupciones. En la secuencia destacan dos niveles de caída de pómez, asociados a erupciones plinianas que se denominan Neltume y Pirehueico, respectivamente. A su vez, entre los depósitos de flujo piroclástico destaca, por su extensión, espesor y variedad de facies, la notable Ignimbrita Enco. El depósito pliniano inferior denominado Neltume (ca. 63% SiO₂), descrito inicialmente por Echegaray et al., (1994), se distribuye, preferentemente, hacia el NNE del CVMCH y alcanza hasta 8,5 m de espesor cerca del lago Neltume y más de 2 m en la localidad de Coñaripe, 40 km al norte, donde presenta un aspecto homogéneo y macizo. El volumen total de este depósito fue calculado en 2,5 km³ por Echegaray (2004) y en 2,9 km³ por Pérez (2005). El depósito de caída Neltume tendría una edad comprendida entre ca. 10,7 y 9,7 ka.

Más arriba en la secuencia, el depósito de pómez de caída Pirehueico se distribuye, preferentemente, hacia el Este y NE del CVMCH y alcanza hasta 3,4 m de espesor al sur de la Pampa Pilmaiquén, donde se dispone estratigráficamente sobre el nivel Neltume. El volumen estimado para esta unidad es del orden de 1 km³. El depósito pliniano Pirehueico tendría una edad comprendida entre ca. 8,2 y 6,7 ka.

Cerca del techo de la secuencia, la denominada Ignimbrita Enco corresponde a un voluminoso depósito piroclástico, que comprende niveles de flujo y oleada junto a depósitos asociados de caída de piroclastos. Se distribuye radialmente en torno al CVMCH y consiste en una unidad principal maciza con material juvenil escoriáceo, rica en líticos, en una matriz de ceniza fina con restos de madera semicarbonizada. Las edades de la Ignimbrita Enco se obtuvieron de madera o restos carbonosos contenidos tanto en el depósito de flujo piroclástico lítico principal como en las oleadas piroclásticas asociadas, muestreados en varios lugares alrededor del volcán, la edad de este depósito sería más próxima a la edad más joven obtenida, es decir, de ca. 1,7 ka.

Finalmente, esta unidad (Hdp) con sus, aproximadamente, 60 depósitos piroclásticos, revela que la actividad eruptiva explosiva ha sido bastante continua durante los últimos 11 ka. Eventos explosivos mayores han ocurrido con una periodicidad máxima de 660 años durante el Holoceno, la cual disminuye a 350 años en los últimos 2,5 ka, lo que evidencia que el CVMCH es uno de los centros volcánicos más explosivos y peligrosos en los Andes del Sur.

3.5.6.6.2 Volcán Choshuenco

Estratovolcán erosionado, que exhibe un prominente cuello volcánico de ca. 150 m de altura, yuxtapuesto al NO del edificio Mocho. El volcán Choshuenco tiene un volumen actual de ca. 20 km³ y sus productos cubren una superficie de ca. 50 km². El volcán antiguo, coalescente con el edificio Mocho 2, podría haber alcanzado un volumen cercano a los 25 km³. El colapso parcial de la parte sur del edificio antiguo se habría producido después de ca. 60 ka, junto con el colapso del volcán Mocho ancestral y la consiguiente formación de la caldera. Durante la última glaciación, se reinició la actividad del volcán Choshuenco a través de centros emisores laterales localizados sobre el flanco noroccidental. Entre sus productos predominan las andesitas basálticas y andesitas silíceas (52-63% SiO₂). La actividad volcánica en este centro se extendió desde el Pleistoceno Medio al Pleistoceno Superior. Los sectores altos del flanco NO del volcán Choshuenco están cubiertos por un manto notable del depósito pliniano de pómez de caída denominado Neltume (base de la secuencia piroclástica holocena Hdp).

Unidad Choshuenco 1 - Plc1 (Pleistoceno medio) (>ca. 100 ka)

Secuencia de fuerte manteo radial al oeste y norte, que alcanza sobre 1.000 m de espesor en el sector noroccidental del complejo volcánico y que constituye el edificio principal del volcán Choshuenco. Forma parte de la secuencia precaldera del complejo y presenta intensa erosión glacial en su cima y en sus flancos superiores. Está constituida, **principalmente, por lavas 'aa' andesítico-basálticas a andesíticas (52-59% SiO₂) y, en menor proporción, por coladas de bloques andesítico-silíceas y dacíticas de olivino y piroxeno (62-68% SiO₂).** El cuello del volcán Choshuenco se encuentra profusamente intruido por diques verticales, algunos de disposición radial. La edad máxima de esta unidad puede acotarse con la edad mínima de ca. 200 ka obtenida para la Unidad Mocho 1, cuyo grado de erosión es más profundo. Concordantemente con este valor, una lava dacítica de la parte baja de la secuencia en el flanco NO fue datada en 200±60 ka (⁴⁰Ar/³⁹Ar 'plateau' en masa fundamental). **Al mismo tiempo, esta unidad puede considerarse, en parte, equivalente de la Unidad Mocho 2 del volcán coalescente, cuyas lavas engranan y afloran en continuidad con las de esta unidad en el sector norte.** Para la primera se obtuvo una edad de ca. 130 ka cercana a su techo y, concordantemente, una lava andesítica cercana al techo de la Unidad Choshuenco 1 en el flanco norte, fue datada en 170±70 ka (⁴⁰Ar/³⁹Ar 'plateau' en masa fundamental).

Unidad Choshuenco 2 – Plc2 (Pleistoceno superior) (ca. 80-20 ka)

Conjunto de lavas expuesto en el flanco NO del volcán Choshuenco, emitidas desde dos centros eruptivos laterales localizados a 1.750 y 1.850 m s.n.m., respectivamente. Las coladas, principalmente de bloques, tienen una longitud de hasta 7 km, espesores medios de 20 m y formas distales lobuladas, con frentes de hasta 30 m. Estas lavas presentan composiciones principalmente andesíticas y dacíticas (59-66% SiO₂). Dos edades concordantes de 53±30 ka y 46±20 ka (⁴⁰Ar/³⁹Ar isócronas inversas en masa fundamental) fueron obtenidas en la sección distal de las coladas, sobre el flanco NO. Esta unidad puede considerarse, en parte, equivalente al techo de la Unidad Mocho 3, con similar posición estratigráfica. Sin embargo, las edades admiten, también, la posibilidad de que estos centros emisores de flanco pudieran haberse reactivado con posterioridad a la formación de la caldera en el Tardiglacial.

3.5.6.6.3 Centros volcánicos adventicios

Grupo Alto Caunahue – Hacl, Hacp (Holoceno) (>ca. 1,7 ka)

Conjunto de trece conos de piroclastos posglaciales y lavas asociadas, dispuestos en dos subgrupos que consisten en 8 y 5 centros eruptivos menores, localizados sobre el flanco suroccidental del volcán Mocho. Tanto los aglomerados, bombas y lapilli gruesos que forman los conos, como sus lavas asociadas, consisten en andesitas de olivino y piroxeno (55-58% SiO₂). Los conos más prominentes alcanzan alturas de 250 m, con bases de hasta 750 m de diámetro y los cráteres mayores tienen de 300 a 400 m de diámetro. Presentan diversos estados de conservación, lo cual reflejaría distintos períodos eruptivos dentro del **Holoceno. Las coladas son de tipo 'aa' y 'pahoehoe' y alcanzan hasta 13 km de longitud, con espesores menores que 10 m. Las coladas más recientes en el valle del río Caunahue, están cubiertas por la Ignimbrita Enco.**

Grupo Ranquil – Hrp (Holoceno)

Conjunto de cuatro conos de piroclastos posglaciales, dispuestos sobre el flanco nororiental del volcán Mocho, en una cadena de dirección NW-SE, sin lavas asociadas. Los aglomerados, bombas y lapilli gruesos que forman los conos, consisten en andesitas de olivino y piroxeno (55-58% SiO₂). El cono más prominente es el denominado Ranquil, con una altura de 260 m, una base elíptica de ca. 1,5 km de diámetro y un cráter de 600 m de diámetro abierto hacia el norte. Por otra parte, el cono mejor conservado es el Pilmaiquén, en el extremo SE de la cadena, de ca. 150 m de altura, con una base de

900 m de diámetro y un cráter circular de 500 m, anidado en uno mayor de 650 m de diámetro. El diferente grado de erosión de estas estructuras volcánicas reflejaría distintos episodios eruptivos del Holoceno. Particularmente, el cono Ranquil y el cráter sin nombre, en el camino de acceso al centro de ski, están claramente cubiertos por el depósito de la Ignimbrita Enco. Por otra parte, se desconoce la relación del volcán Pilmaiquén, el más joven del grupo, con la mencionada ignimbrita.

3.5.6.6.4 Otros volcanes del área

Grupo Fui – Hvfl, Hvfp (Pleistoceno superior tardío - Holoceno)

Conjunto formado por veinte conos de piroclastos posglaciales y lavas asociadas, organizado en tres cadenas menores y dispuesto al pie NE del CVMCH. Las cadenas volcánicas constituyen alineamientos de direcciones predominantes NE-SO y NNE-SSO. Los productos volcánicos de este grupo rellenaron parte del valle glacial del río Fui, lo represaron y dieron origen al lago Pirehueico. Los aglomerados, bombas y lapilli gruesos que forman los conos, así como sus lavas asociadas, consisten en andesitas basálticas y andesitas silíceas de olivino y piroxeno, y algunos alcanzan incluso composiciones dacíticas (54-64% SiO₂). Los conos de piroclastos, dispuestos en pequeñas cadenas de hasta 4,5 km de longitud, tienen alturas variables entre 150 y 250 m, con bases de hasta 1.250 m de diámetro y cráteres de 200 a 750 m de diámetro, abiertos o cerrados. Las **coladas son de tipo 'aa' y de bloques**, alcanzan espesores de hasta 30 m y tienen generalmente menos de 5 km de longitud. Los denominados Saltos de Huilohuilo se forman sobre las lavas más antiguas asociadas a este grupo, las que presentan en ese **sector fracturamiento tipo 'hackle joints', interpretado como evidencia de emplazamiento bajo hielo** (e.g., Lescinsky y Fink, 2000). Este habría ocurrido durante el Pleistoceno Superior tardío, hacia el final de la última glaciación, cuando los glaciares en retroceso aún ocupaban el fondo de los valles al interior de la cordillera.

La morfología de las estructuras del Grupo Fui, en cuanto a su estado de conservación y grado de erosión, refleja diferentes ciclos eruptivos, principalmente ocurridos durante el Holoceno. Asimismo, varias coladas y depósitos piroclásticos asociados a este grupo engranan con los depósitos de la Secuencia Piroclástica (Hdp) y, en consecuencia, la actividad de este grupo volcánico habría ocurrido de manera intermitente, pero contemporánea con el volcanismo explosivo del edificio principal, eventualmente desde el Pleistoceno superior tardío hasta ca. 1.100 años AP (Pérez, 2005).

Volcanes Chanchán – Hvcc (Pleistoceno superior tardío - Holoceno)

Conjunto de conos y centros emisores sin cráter, principalmente posglaciales, con lavas asociadas, ubicados en el sector nororiental y que forman un alineamiento volcánico de dirección NE-SO. Corresponden a pequeños estratovolcanes con predominancia de material piroclástico, cuyas alturas máximas alcanzan 600 m y sus bases tienen hasta **3 km de diámetro. Las lavas de tipo 'aa' corresponden a basaltos de olivino y piroxeno** (50% SiO₂), con rasgos geoquímicos más primitivos que los reconocidos en los otros centros eruptivos del área de estudio. La morfología, parcialmente conservada de estas estructuras volcánicas, aunque con evidentes signos de erosión, permite suponer que se habrían formado durante el Pleistoceno Superior tardío y el Holoceno temprano.

3.5.6.7. **Depósitos sedimentarios**

Depósitos glaciales, glaciofluviales y deltaicos – Plg (Pleistoceno superior)

Diamictos de bolones, arena y limo, junto a bancos de gravas y arenas, moderadamente consolidados, que forman morrenas y abanicos fluvioglaciales, en parte deltaicos. En el área del CVMCH, tanto en el fondo de los valles como en algunas laderas, se reconocen afloramientos aislados de estos materiales que se asociarían a los distintos avances y retrocesos del hielo durante la Glaciación Llanquihue (110-14 ka; Clapperton, 1993; Clayton et al., 1997). Las morrenas son diamictos con fragmentos polimícticos, redondeados a subredondeados, de hasta 1 m de diámetro, inmersos en una matriz fina tamaño arena fina y limo. Los depósitos glaciofluviales y deltaicos asociados tienen escasa extensión areal y están formados por bancos de gravas bien seleccionadas, medias a finas, intercaladas con arenas que, localmente, exhiben estratificación planar y entrecruzada. Mientras las morrenas pueden representar períodos de avance durante el último máximo glacial (ca. 32-14; Lowell et al., 1995), los abanicos fluvioglaciales representarían la sedimentación asociada en el Pleistoceno Superior.

Depósitos fluviales antiguos – PIHf (Pleistoceno superior - Holoceno)

Bancos de gravas y arenas con intercalación de limos y arcillas. Afloran en el sector NO del CVMCH (alrededores del extremo SE del lago Panguipulli), presentan escasa extensión y corresponden a remanentes de terrazas antiguas más elevadas que el nivel actual del lago Panguipulli. Están constituidos, mayoritariamente, por depósitos fluviales con intercalaciones de depósitos lacustres, organizados en capas cuyos espesores individuales

no superan 1,5 m.

Depósitos glaciales recientes – Hg (Holoceno)

Diamictos formados por bolones volcánicos, redondeados a subangulosos, de hasta 2 m de diámetro, inmersos en una matriz gravoarenosa. Corresponden principalmente a morrenas frontales, laterales y de fondo, de escaso espesor, ubicadas en la parte alta del edificio, distribuidas alrededor de la caldera y asociadas a la dinámica en retroceso del glaciar actual del complejo volcánico. Estos depósitos cubren parcialmente incluso lavas de las unidades holocenas del volcán Mocho y presentan morfología definida por un **manto de 'cerrillos', aproximadamente sobre la cota 1.400 m, aunque en el flanco suroriental del edificio principal se les encuentra también desde la cota 1.200 m.** Estos depósitos morrénicos, de extensión reducida, serían el resultado de los avances experimentados por los glaciares de montaña en el Holoceno (e.g., Clapperton, 1993). En el CVMCH, estos depósitos corresponden a los materiales remanentes del último avance del glaciar que rellena la caldera, el cual podría haber ocurrido durante la denominada **'Pequeña Edad del Hielo' en el hemisferio norte, reconocida imprecisamente también en el hemisferio sur a partir del siglo XIV (Clapperton, 1993) y en los siglos XVIII-XIX (Rabassa et al., 1990).**

Depósitos de remoción en masa y coluviales – Hrm (Holoceno)

Depósitos clásticos de mala selección, con morfología de conos o lóbulos con pendientes superiores a 20°, formados por depósitos de flujo de detritos, coluviales y de deslizamiento de rocas, los dos últimos tipos generados por colapso gravitacional de taludes en condiciones inestables. Los flujos de detritos habrían sido gatillados por la ocurrencia de lluvias torrenciales y los depósitos aluviales asociados se acumularon al pie de quebradas estrechas e incluyen fragmentos angulosos a subangulosos, tamaño gravas, con una matriz de arena y arcilla-limo. Los depósitos coluviales incluyen fragmentos angulosos a subangulosos de mala selección que, mayormente, forman acumulaciones clastosoportadas, con escasa o ninguna matriz fina, organizándose como escombros de talud en laderas de pendiente fuerte. Los depósitos asociados a deslizamientos son más abundantes en el sector suroriental, especialmente en el valle del río Blanco (Pillanleufú), **donde presentan morfología superficial de cerrillos ('hummocks') y están constituidos por bloques subangulosos, densamente fracturados, de rocas estratificadas terciarias (OMlr).** Un deslizamiento reciente y flujo de detritos asociado, notable en las fotografías aéreas e

imágenes satelitales, se puede apreciar en las cabeceras del valle del río Chico, en el flanco sur del edificio volcánico principal, el cual se habría generado por desprendimientos de hielo del glaciar, que incorporó rocas volcánicas en el escarpe del sector. Sus depósitos cubrieron lavas del Grupo Alto Caunahue (HacI) y se extendieron como una capa delgada sobre la Secuencia Piroclástica (Hdp).

Depósitos deltaicos y de playas lacustres actuales – Hd (Holoceno tardío)

Los depósitos clásticos dispuestos principalmente en la desembocadura del río Llanquihue en el lago Panguipulli y en el sector de la entrada del río Enco en el lago Riñihue están formados por gravas medias e intercalaciones de arenas con laminación paralela bien desarrollada y ocasionalmente entrecruzada y organizados en capas de espesor centimétrico a decimétrico. Los depósitos de playas lacustres se ubican principalmente en el sector noroccidental del lago Pirehueico (Puerto Fui) y en el litoral del lago Panguipulli, en la localidad de Choshuenco. Corresponden a acumulaciones de sedimentos finos bien seleccionados, principalmente de origen volcánico y de tamaño arena media a fina, con partículas redondeadas, que forman bancos horizontales de espesor variable.

Depósitos fluviales actuales – Hf (Holoceno tardío)

Depósitos clásticos reconocidos en los cauces de los ríos Blanco-Pillanleufú, Fui, Neltume, Llanquihue y Enco. Se presentan relativamente bien seleccionados y dispuestos en capas de espesor variable entre algunas decenas de centímetros y metros. Están formados por fragmentos redondeados a subredondeados, polimícticos, de tamaño grava media a gruesa, con intercalaciones de arenas medias a gruesas. Aunque afloran en forma restringida, en el río Enco forman una terraza más extensa integrada por bancos polimícticos de buena selección.

3.5.6.8. ***Historia Eruptiva del Volcán Mocho-Choshuenco***

La actividad del volcán Mocho-Choshuenco se ha desarrollado durante el Pleistoceno medio y el Holoceno, aparentemente en forma continua, esta historia queda recogida en las 5 unidades definidas en el capítulo 3.3.6.3, algunas de las cuales son contemporáneas a las 2 unidades definidas para el volcán Choshuenco. Si bien a lo largo de su historia el volcán ha producido coladas de lava, parece ser que durante el postglacial han predominado erupciones explosivas que han producido importantes volúmenes de

piroclastos. Moreno y Lara (2007) informan de hasta 60 depósitos piroclásticos Holocenos. Esto refleja un vulcanismo altamente explosivo y recurrente en los últimos 11.000 años, lo que convierte a este volcán en uno de los centros más peligrosos de Chile.

El registro eruptivo histórico del volcán Mocho (principal centro activo del complejo) abarca desde el año 1759 hasta mediados del siglo XIX, con 5 erupciones históricas documentadas (Petit-Breuilh, 2004), si bien algunas de ellas no han sido confirmadas con datos de terreno. Las crónicas reportan erupciones explosivas en 1759 y 1777 y de tipo estromboliano en 1822 y 1863, según se deduce de las descripciones aportadas por Göll (1904). La última de ellas habría sido precursora de la erupción explosiva de 1864, el principal y último evento eruptivo histórico registrado en este volcán, aparentemente de tipo subpliniano. Los antecedentes recopilados por Petit-Breuilh (2004) y el relato realizado por Vidal Gormaz (1869) para esta erupción iniciada el 1 de noviembre de 1864, **revelan la ocurrencia de flujos piroclásticos al señalar que 'por las quebradas del volcán corrían arroyos de fuego'. Por otra parte, testimonios más recientes indican que 'en tiempos pasados la región vivió una trágica experiencia al hacer erupción el Choshuenco, pues acabó con toda la población de los alrededores; además, las aguas del lago Panguipulli habrían "hervido" como resultado de la erupción (Bernales, 1990).**

Actualmente no se conoce en detalle la historia eruptiva postglacial del volcán Mocho-Choshuenco aunque se está trabajando en ampliar dicho conocimiento. Los antecedentes geológicos disponibles, especialmente el registro de depósitos piroclásticos, permiten señalar que las erupciones explosivas holocenas se habrían generado principalmente en centros de emisión del interior de la caldera y, las más recientes, en el cono actual del volcán Mocho (Naranjo et al., 2001; Pérez, 2005; Moreno y Naranjo, 2006). En consecuencia, la probabilidad de ocurrencia de erupciones explosivas con generación de flujos piroclásticos debe considerarse alta con efectos potenciales en todo el sector circundante.

Aunque el estudio de las secuencias de piroclastos existentes aún no permite establecer una secuencia detallada de los eventos eruptivos, sí nos permite observar varios eventos de magnitud mayor al resto y que han sido estudiados en mayor detalle por diversos autores y datados con buena precisión. Cronológicamente tendríamos como primer evento importante la erupción de tipo pliniano que produjo el depósito de pómez Neltume

(Echegaray 1994) que presenta una edad comprendida entre ca. 10,7 y 9,7 ka. Se trata de un depósito de piedra pómez que alcanza hasta 8,5 m de espesor cerca del lago Neltume y más de 2 m en la localidad de Coñaripe, 40 km al norte, donde presenta un aspecto homogéneo y macizo. Se distribuye, preferentemente, hacia el NNE del volcán. El volumen total de este depósito fue calculado en 2,5 km³ por Echegaray (2004) y en 2,9 km³ por Pérez (2005).

El segundo evento de importancia estudiado corresponde al depósito de pómez Pirihueico **de menor volumen que el anterior ($\approx 1 \text{ km}^3$)**, Morena y Lara, 2007) y que se distribuye preferentemente hacia el Este y el Noreste del volcán. Este evento habría ocurrido aproximadamente entre 8,2 y 6,7 ka. El siguiente evento importante ocurrió hace aproximadamente entre 1850 y 1650 años antes del presente y produjo la ignimbrita Enco, un voluminoso depósito piroclástico, que comprende niveles de flujo y oleada junto a depósitos asociados de caída, que se distribuye de forma radial en torno al volcán. Esta ignimbrita está formada por varias unidades de flujos piroclásticos, oleadas asociadas, piroclastos de caída y muy probablemente produjo lahares importantes (Naranjo, comunicación personal). Se trata de un evento eruptivo muy complejo que afectó a los 360° del volcán, que se encuentra en todos los valles que descienden del volcán y que debió fundir importantes cantidades de hielo y nieve (Naranjo, comunicación personal), produciendo importantes lahares primarios y probablemente secundarios.

El siguiente evento estudiado y datado (Naranjo, comunicación personal) corresponde a una erupción ocurrida hacia el año 1550 d.C. y tendría unas características similares a la anterior si bien su explosividad fue menor, este evento presenta buenas exposiciones al Este del volcán en el sector de la pampa Pilmaiquén. El último evento importante del volcán corresponde a la erupción de 1864, recogida en las crónicas históricas. Según estas parece ser que fue una erupción con importantes flujos de piroclastos que bajaron por todas las faldas del volcán, destruyendo todo a su paso y matando a los habitantes de la zona. Según Naranjo (comunicación personal) se trataría de una erupción similar a las de 1550 y Enco en cuanto a los procesos eruptivos ocurridos, si bien esta última sería sensiblemente menos explosiva que las anteriores.

Si bien las crónicas históricas no indican la ocurrencia de lahares, parece probable que estos ocurrieran ya que erupciones similares han provocado históricamente lahares en otros volcanes (Nevado del Ruíz, 1985). Así mismo, durante los trabajos de terreno de

este estudio se localizaron diversos afloramientos con sedimentos de lahares en varios de los cauces estudiados. Es muy probable que los lahares ocurridos en el Mocho-Choshuenco sean tanto de tipo primario como secundario (Naranjo, comunicación personal). Los de tipo primario serían aquellos producidos como resultado de la erupción volcánica al fundir los procesos eruptivos el hielo y la nieve presente en el momento de la erupción. El agua procedente de la fusión correría ladera abajo incorporando sedimentos a lo largo de su recorrido y concentrándose en los cauces. Lahares de tipo secundario serían aquellos resultados de la remoción por lluvias del material volcánico suelto disponible en las laderas del volcán. Es de remarcar la existencia de abundantes **depósitos de material "suelto" en la parte media-alta** del volcán, como son los depósitos de morrenas glaciares o los depósitos de piroclastos. Todo este material contribuiría de manera importante a los volúmenes de los lahares y a su poder erosivo.

3.5.7. Características de un Lahar

Un lahar es un flujo de sedimento y agua que se moviliza desde las laderas de volcanes y que fluye pendiente abajo en respuesta a la fuerza de gravedad (Vallance, 2000). Durante los últimos siglos, los lahares han destruido más propiedad pública o privada que cualquier proceso volcánico y han sido los causantes de la pérdidas de miles de vidas humanas. Los lahares, junto con la caída de tefra, son la principal causa de riesgo asociado a volcanes.

3.5.7.1. Generalidades

Los lahares fluyen como flujos en masa, transicionales o hiperconcentrados. Los flujos de lodo o las crecidas tienen una menor concentración de sedimento que los flujos hiperconcentrados y principalmente lo transportan como los cursos fluviales normales, las partículas finas en suspensión y las más gruesas como carga de fondo. Aunque algunos flujos de lodo o crecidas están genéticamente relacionadas con eventos laháricos, la mayoría no lo están y por lo tanto el término lahar no debe incluir ese tipo de flujos. A diferencia de las avalanchas de detritos, los lahares son depósitos húmedos donde el agua influye tanto en la génesis como en el transporte de la masa movilizada.

Los lahares pueden ser primarios (sincrónicos con la erupción) o secundarios (posteriores a la erupción o no relacionados con ninguna). La génesis de un lahar requiere (1) una adecuada fuente de agua (lago, agua hidrotermal, **hielo, nieve,...**), **(2) abundante material** no consolidado que típicamente incluye flujos piroclásticos, piroclastos de caída, morrenas glaciares, coluviones, suelos, etc.; (3) pendientes elevadas y un relieve importante en su zona de inicio; y (4) un mecanismo que lo desencadene.

Los lahares pueden ocurrir debido a:

- Períodos de lluvia intensos, no necesariamente coincidiendo con períodos de actividad volcánica.
- Fusión de glaciares en las partes altas de un volcán, durante actividad volcánica.
- Vaciado de un lago hospedado en la cumbre de un volcán.
- Desplome de ladera debido a prolongada alteración hidrotermal o sismo.

Major y Newhall (1989) indican que los fenómenos volcánicos más importantes en la formación de lahares son (1) los surcos de fusión provocados por flujos de piroclastos o explosiones de gases calientes y (2) fusión en la base del glaciar por erupción subglaciar o actividad geotermal. Se dispone de pocos datos sobre las causas de los lahares del Mocho-Choshuenco pero por el tipo de vulcanismo es presumible que lo sea el primer proceso indicado por Major y Newhall. Moreno (1993) indica, para el caso del volcán Villarrica, que al parecer los lahares se producen cuando una colada de lava escurre desde el cráter principal por debajo del glaciar en un principio y, debido al calor, se funde y desploma el techo de hielo, dejando un profundo canal.

En el cono del Mocho-Choshuenco los grandes lahares se originarían por la violenta fusión de las masas de glaciares y mantos de nieve que persisten en los faldeos del volcán, cuando son alcanzadas por flujos y/o caída de piroclastos incandescentes. La fusión de hielo/nieve por corrientes de lava parece menos probable debido al tipo de vulcanismo del Mocho, pero en caso de que ocurriera una colada el proceso de fusión debería ser similar al mencionado por Moreno para el Villarrica.

La razón principal de que este tipo de eventos sea tan frecuente en los volcanes es que comúnmente las pendientes de los volcanes activos son cubiertas por abundantes fragmentos sueltos de roca principalmente volcánica que pueden mezclarse con el agua

formando flujos descendentes.

Si la pendiente es fuerte, el flujo tendrá un efecto principalmente erosivo sobre el cono. A medida que el flujo baja por las laderas del estratovolcán, la pendiente disminuye por lo tanto pierde energía y empieza a dejar su carga sólida, formando depósitos de detritos de varios metros de espesor. En especial cuando las laderas del cono son muy empinadas los flujos bajan con gran velocidad y energía (velocidades cercanas a los 100 km/h) y pueden aprovechar el curso de los valles, sepultando vastas áreas topográficas y causando un efecto no despreciable sobre la configuración del relieve. Hay casos en donde el flujo lahárico ha logrado alcanzar una distancia de 300 km desde su lugar de procedencia.

3.5.7.2. **Reología de un lahar**

El comportamiento reológico de una mezcla de sedimento y agua puede ser Newtoniano como no-Newtoniano, dependiendo de la concentración de sedimento, del tipo de sedimento y de la distribución del tamaño de las partículas. Las mezclas con peor clasificación granulométrica que ocurren en la naturaleza están compuestas por una fase fluida de agua y finos (arcilla y limo) y una fase granular de arena y gravas (Rodine, 1974; Hampton 1975; Pierson 1981). La arcilla y la mayor parte del limo son considerados intrínsecamente parte del fluido ya que normalmente no son segregadas de la suspensión durante un flujo natural. Por otro lado, la arena y la grava pueden o no ser transportadas en suspensión en un flujo determinado.

En las mezclas Newtonianas y en las no-Newtonianas con un esfuerzo de cizalla muy bajo, cualquier partícula de arena o grava es libre de depositarse aunque las velocidades de caída decrezcan (Nordin y Dempster, 1963; Simons et al., 1963). Estas mezclas pueden ser denominadas no-homogéneas (Qian et al., 1980) ya que las fases fluidas y granular son libres de actuar de manera independiente la una de la otra mientras fluyen, al menos parcialmente. Suspensiones en el rango de concentraciones en volumen del 20-60% (40-80% en peso), denominadas "hiperconcentrados" (Beverage and Culbertson, 1964), generalmente muestran este comportamiento. Otros autores consideran un 66% de concentración de sólidos como límite superior (Tom Pierson, USGS Fact Sheet 2004-3142).

En mezclas de grano grueso el incremento del esfuerzo de cesión es debido a la aparición de interacciones de fricción entre las partículas de la fase granular, las cuales son aditivas

a las fuerzas cohesivas producidas por las partículas finas y a la viscosidad del fluido intersticial. En el momento que el esfuerzo de cizalla de una mezcla estática es suficiente para poner la grava en suspensión y las partículas gruesas y finas ya no pueden depositarse independientemente, el flujo se convierte en un flujo de detritos o un flujo de lodo, dependiendo del contenido de grava. Los flujos de detritos contienen más de un 50% de grava, los de lodos menos (Varnes, 1978). Un flujo de detritos o de lodo se comporta como una sustancia plástica homogénea; el fluido ya no actúa como medio de transporte sino como fluido en los poros de una entrelazada masa de granos saturada.

Suspensiones densas no-Newtonianas fluyendo en un canal abierto pueden exhibir características bastante diferentes de un flujo normal acuoso: (1) un frente inclinado y redondeado que generalmente contiene una alta concentración de bloques; (2) levées laterales con las partículas más gruesas disponibles; (3) tendencia a fluir en oleadas sucesivas; (4) tendencia a segregar las partículas más gruesas hacia la superficie y el centro del flujo; y (5) tendencia de los esfuerzos a concentrarse en los límites del flujo.

En un tramo determinado, los flujos hiperconcentrados, ricos en agua, tienden a ser más erosivos que las fases más ricas en sedimentos (flujos de detritos), pero erosiones localizadas pueden ocurrir en cualquier tipo de flujo. Asimismo las fases terminales de un lahar suelen ser erosivas y culminan con la incisión de canales en los sedimentos laháricos recién depositados. La presencia de depósitos no consolidados (como caída de tefra) bajo sedimentos laháricos sugiere que la fase erosiva ocurre principalmente en los flujos hiperconcentrados.

La incorporación de sedimentos a lo largo del trayecto transforma el flujo acuoso inicial en un flujo hiperconcentrado que va enriqueciéndose en sólidos. Si el proceso continúa el flujo hiperconcentrado se puede transformar en un flujo de detritos. A medida que el flujo se aleja del volcán y abandona los cursos confinados, los lahares, que generalmente se mueven más rápido que el flujo normal de un río, empujan el agua delante de ellos y gradualmente comienzan a mezclarse con ella. Como el frente comienza a diluirse, pierde su capacidad de transporte y deposita las partículas más gruesas, transformándose progresivamente en un flujo hiperconcentrado y si se dan las condiciones adecuadas en un flujo normal acuoso.

En flujos con cizalle o en vibración con partículas más densas que el fluido y con concentraciones de partículas superiores al 40%, la percolación predomina sobre el

asentamiento. En estos flujos se abren huecos constantemente bajo las partículas. Si el tamaño de la partícula es comparable o más pequeño que el hueco, la partícula cae en él. En un fluido con diferentes tamaños de partículas, la probabilidad de que se abran huecos por donde quepan las partículas pequeñas es mayor que la probabilidad de que se abran huecos del tamaño de las partículas más grandes. La percolación solo actúa hacia abajo, por lo cual para mantener el equilibrio vertical de masa, debe existir un proceso mediante el cual las partículas migren hacia arriba. Los desequilibrios de fuerzas o la rotación de las partículas empujan partículas desde una capa a otra. Este proceso se denomina dispersión de granos y puede actuar hacia abajo o hacia arriba indistintamente, no necesariamente actúa preferencialmente por determinados tamaños de grano. La combinación de la percolación y la dispersión de granos se denominan tamizado cinético.

El resultado neto del tamizado cinético es que las partículas pequeñas migran hacia abajo, desplazando a las más grandes que gradualmente migran hacia arriba. Las partículas más grandes también migran hacia adelante en dirección a los márgenes del flujo debido a que las velocidades son más altas en la superficie. El tamizado cinético no es solo responsable de la gradación inversa que se da frecuentemente en los flujos de detritos, sino que también es responsable de la acreción de las partículas más grandes en el perímetro del flujo.

3.5.7.3. ***Depósitos Laháricos***

Generalmente los depósitos laháricos son masivos o débilmente estratificados y pueden estar gradados o no, dependiendo de la proporción de agua contenida en el fluido y el grado de dilución cauce abajo. Gradación inversa y normal, o ambas al mismo tiempo son comunes. El grado de clasificación es generalmente pobre o muy pobre.

Aunque los depósitos laháricos formados por flujos de detritos y aquellos resultados de los flujos hiperconcentrados a los que comúnmente evolucionan, tienen bastantes similitudes también presentan muchas diferencias. Por lo tanto es necesario caracterizar cada tipo de depósito separadamente.

Los depósitos, resultado de un flujo de detritos están mal clasificados, generalmente son masivos y no presentan estratificación. La distribución del tamaño de partículas suele ser bimodal. Pueden ser tanto normal como inversamente gradados, incluso pueden ser

inversamente gradados en la base y normalmente gradados en el techo. Los depósitos suelen ser compactos y en algunos casos pueden llegar a endurecerse. Las partículas que forman el depósito pueden ser monomícticas pero generalmente son polimícticas. Pueden ser desde redondeadas a angulosas, las partículas primarias (procedentes de la erupción) suelen ser angulares o subangulares, el resto depende de su origen. Estos depósitos pueden tener vesículas en la matriz, resultado del atrapamiento de burbujas de aire. Otros constituyentes comunes son fragmentos de árboles, moldes de fragmentos de árboles y carbón. Concentraciones de partículas gruesas en el techo es frecuente. El espesor de los depósitos de flujos de detritos varía desde decenas de centímetros a decenas de metros. Potentes depósitos de relleno se dan en los fondos de los valles y en las zonas bajas. En las terrazas más altas y en los carenas entre valles son más finos. Levées y lóbulos frontales de pendiente elevada son comunes en aquellos flujos que no han sufrido mucha dilución a lo largo de su camino. Es común pensar que este tipo de flujos son emplazados en masa y representan una imagen congelada del flujo mismo.

En contraste los depósitos de flujos hiperconcentrados se encuentran mejor clasificados, es frecuente que muestren una estratificación incipiente y por lo tanto tienen procesos de agradamiento durante intervalos de tiempo significativos. Tienen características intermedias entre los depósitos de un flujo de detritos y los depósitos aluviales de un río. Tienen unos coeficientes de clasificación y un tamaño de grano intermedios. Pueden ser masivos pero suelen presentar un débil y fina estratificación paralela o cruzada de muy bajo ángulo, resultado de la alternancia de láminas de tamaño de grano más fino con otras más gruesas. Las facies de llanura de inundación tienen un tamaño de grano en el rango micrograva, arena, limo, con algunos cantos más grandes flotando. Las facies de canal suelen ser clatosportados y muestran una fuerte bimodalidad, con una importante concentración de clastos rodeando la matriz limoarenosa con micrograva. Las vesículas se encuentran a veces pero son menos importantes que en los depósitos de flujos de detritos. Los depósitos son compactos y suelen crujir cuando son excavados con una pala. Aunque es raro, pueden presentar estructuras de escape de agua. Los depósitos resultado de un flujo hiperconcentrado tienen un techo plano y su espesor varía desde escasos centímetros hasta muchos metros. Los depósitos más potentes se dan en los canales u otras zonas bajas cercanas. Los depósitos más finos se dan en las zonas más altas, como las llanuras de inundación o en las laderas de los valles.

3.5.8. Escenarios Eruptivos Probables

Si realizamos un análisis del tipo de erupciones ocurridas en el Mocho podremos observar que erupciones en los últimos tiempos han sido desde Vulcanianas hasta Plinianas. Las más frecuentes son aquellas de tipo Vulcaniano, sin embargo las Plinianas también han sido recurrentes.

Al menos 60 depósitos de piroclásticos han ocurrido en el volcán Mocho durante el Holoceno (Moreno y Lara, 2007), siendo el último el ocurrido durante la erupción de 1864. La eventual ocurrencia de un flujo piroclástico, podría afectar un área similar a la de la última erupción o incluso mayor si tenemos en cuenta la erupción de ca. 1550 d.C. o la de hace 1850 años (ignimbrita Enco), transformando toda la zona en alto riesgo.

Se han definido 4 escenarios eruptivos para el volcán Mocho-Choshuenco. En la elaboración de estos escenarios se tomaron en cuenta los siguientes aspectos:

- Dinamismo eruptivo, es decir los tipos de erupciones que podrían darse en el volcán.
- Los procesos eruptivos desarrollados en cada tipo de erupción, es decir si predominan coladas, flujos de piroclastos,...
- La interacción entre los productos volcánicos y el glaciar, que puede expresarse como función de los dinamismos eruptivos y del estado del glaciar.
- El tamaño del glaciar y el porcentaje de fusión del mismo.

Se debe subrayar que los escenarios eruptivos no representan exactamente el tamaño de una erupción « tipo » del volcán, y deben considerarse como rangos de variación de los fenómenos analizados. De igual manera, se debe recalcar que las cifras de los volúmenes de los potenciales lahares, para cada escenario, deben ser consideradas como indicativas **de un "orden de magnitud" y no como estimaciones de un evento volcánico preciso.**

Para la estimación de los caudales de los lahares, en cada escenario se han considerado dos posibilidades, (1) que la erupción ocurra a finales de verano, momento en el cual la práctica totalidad de la nieve de temporada ha desaparecido y solamente queda disponible para fusión el hielo glaciar, este subescenario correspondería al volumen

mínimo de agua disponible; y (2) el subescenario correspondiente al volumen máximo de agua disponible que sería aquel en el cual la altura de nieve de temporada es máxima. Según los antecedentes de la zona esto corresponde a finales de invierno o inicio de primavera.

De los 4 escenarios definidos, 3 corresponden a erupciones explosivas de tipo vulcaniano y corresponden a la emulación de las erupciones de 1864, ca. 1550 y la que produjo la ignimbrita Enco (ordenadas de menor a mayor magnitud), y la 4^a corresponde a una erupción efusiva de lavas andesítico-dacíticas que si bien es un tipo de erupción de la cual no existen evidencias de que haya ocurrido durante las últimas eventos volcánicos, hemos decidido incorporarlo como ejercicio que permita valorar los volúmenes de lahares producidos por ese tipo de erupción.

En los primeros 3 escenarios los procesos que principalmente producirían fusión de agua serían flujos de piroclastos y oleadas, caída de tefra, fallas y avalanchas de hielo, sedimentos y rocas. Para estimar la cantidad de agua fundida en estos escenarios se ha realizado una correlación entre las erupciones tipo del Mocho y la erupción del Nevado del Ruiz en Noviembre de 1985. Pierson et al (1990), Huggel (2007) y Thouret (2007) realizaron estimaciones del volumen de manto nival y glaciar perdidos durante dicha erupción. Según Naranjo (comunicación personal) la erupción del Nevado del Ruíz tuvo una magnitud que se hallaría entre las erupciones de 1864 y ca.1550. A partir de estos datos se ha realizado una estimación del porcentaje de hielo/nieve fundido en cada escenario (ver más adelante).

3.5.8.1. Escenarios 1 (1864), 2 (Ca. 1550) Y 3 (Ig. Enco): Erupciones Subplinianas A Plinianas

Según Major y Newhall (1989) el principal fenómeno productor de lahares son los flujos de piroclastos o las avalanchas volcánicas producidas por la explosión de gases calientes que destruye parte o la totalidad del cono volcánico. Tal como se ha indicado antes, parece ser este el fenómeno más frecuente en el Mocho-Choshuenco, ya que existen evidencias en el registro geológico del volcán de erupciones capaces de producir flujos de piroclastos de importancia.

A la fecha, se han detectado unos 60 flujos de piroclastos en el volcán Mocho-Choshuenco (Moreno y Lara, 2007), emitidos durante los últimos 11.000 años, lo cual significa un evento cada 180 años, aproximadamente. El último flujo de piroclastos importante registrado es el de la erupción de 1864, aunque los tiempos de recurrencia son un recurso estadístico que no tiene por qué reflejar fielmente la realidad.

Por ello y revisando la información existente del volcán se pueden calificar las erupciones del Mocho-Choshuenco como Vulcanianas y Plinianas. Es frecuente que erupciones de este tipo produzcan flujos de piroclastos capaces de producir lahares (Nevado del Ruiz, Colombia, 1985).

Por todo ello se asume como escenario factible el de una erupción de tipo sub-pliniano a pliniana con emisiones importantes de flujos de piroclastos, oleadas y piroclastos de caída que afectarían los alrededores del volcán, provocando la fusión de importantes cantidades de hielo y nieve. En este escenario se generarían flujos y oleadas de piroclásticos que descenderían por todos los flancos del volcán, caída de tefra, fallas y avalanchas debido al movimiento sísmico de la erupción. En este caso, el glaciar sería gravemente afectado tanto por el tránsito de los flujos y oleadas de piroclásticos sobre él (abrasión mecánica), como por el contraste de temperaturas entre el material incandescente y el hielo (abrasión térmica). Estos procesos, altamente dinámicos, producirían una importante interacción entre el material piroclástico y el hielo. Además, como resultado del movimiento sísmico los esfuerzos de cizalla de esta interacción, más el agua fundida que puede percolar hacia la base del glaciar y el agrietamiento ya existente del glaciar (ver Fig. 3.5.8.1-A) y/o nuevo producido por la actividad sísmica que acompañaría a la erupción, se producirá el deslizamiento de importantes masas de hielo en los márgenes exteriores del glaciar.

La fusión de hielo y nieve en este escenario sería relativamente rápida, debido a la alta velocidad que alcanzan los flujos de piroclastos y a la corta distancia que hay entre la cima del cráter y el límite inferior de hielo/nieve (entre 2 y 3 km en la mayor parte de las cuencas).



Fig. 3.5.8.1-A. Imagen en la cabecera del río Mocho, al sudeste del volcán donde se aprecia el alto grado de fracturamiento del glaciar (fuente: Geoestudios, mayo 2013).

Según los datos recopilados por Pierson et al (1990) en el Nevado del Ruíz, la oleada de piroclastos erosiona la nieve y el hielo fracturado cavando surcos radiales en las pendientes más abruptas de la cima del glaciar. La erosión estimada es de menos de 2 m excepto en las zonas donde los canales pasan por zonas fracturadas. Las oleadas piroclásticas derriten principalmente nieve y muy poco hielo. Sin embargo algunos fragmentos de hielo pueden ser arrastrados e incorporados en los depósitos de las oleadas piroclásticas por mezcla turbulenta.

Los flujos piroclásticos tienen una mayor intervención con la nieve y hielo que las oleadas. Los primeros flujos de piroclastos pueden erosionar toda la nieve y varios metros de hielo fracturado. Los flujos dejan canales de fondo plano de hasta 100 m de ancho y de 2-4 m de profundidad, en el hielo. La socavación es mayor en los ejes y disminuye hacia los bordes. El ancho y profundidad de los socavones disminuye rápidamente pendiente abajo, con muy poca erosión en los bordes del glaciar. La mayoría de la nieve y hielo

erosionados con los flujos piroclásticos se une a los flujos en forma turbulenta y en los ejes del flujo se derriten producto de la mezcla turbulenta que facilita la transferencia de calor. El agua proveniente del derretimiento de nieve y hielo en los ejes de los primeros flujos piroclásticos es la principal fuente en las primeras olas de flujos laháricos aguas abajo. La erosión de hielo y nieve provocada por la erupción sub-pliniana en el volcán Nevado del Ruiz difiere de la erosión provocada por erupciones en el Cotopaxi en 1987 (flujos piroclásticos de magma tipo andesítico-basáltico) y el Villarrica en 1985 (flujos de lava de magma tipo basáltica), ya que en el Nevado del Ruiz la erosión por piroclastos es mucho menos profunda y más distribuida debido probablemente a la menor duración de contacto dinámico con los piroclastos calientes y la menor temperatura del magma con mayor contenido de sílice (de tipo dacítico a andesítico).

La caída de tefra y los depósitos estacionarios de flujo piroclástico producen derretimiento de la nieve y hielo producto de la transferencia pasiva de calor desde los detritos piroclásticos a la capa de nieve y/o hielo bajo ellos. El agua derretida por este tipo de contacto puede llegar a 33-46 mm/30 min. Este tipo de derretimiento aumenta con la cantidad de fragmentos líticos en los piroclastos y con la penetración de proyectiles calientes en la nieve. Estos dos hechos ocurrieron en la erupción del Nevado del Ruiz. El derretimiento pasivo es más lento que el provocado por erosión y mezcla turbulenta pero es más prolongado y disperso.

En el Nevado del Ruiz, la actividad sísmica y explosiones freáticas precedentes a la erupción aumentaron las fracturas y almacenamiento de agua en el glaciar, aumentando las fallas ocurridas durante la erupción. En la erupción del Nevados del Ruiz las fallas más **importantes ocurridas fueron del tipo "avalanchas" mixtas, en menor grado ocurrieron fallas de solo nieve, hielo o roca. Las "avalanchas" mixtas fueron importantes** contribuidores de agua a los flujos laháricos. Estas se forman por fallas de masas de **nieve, hielo, agua y detritos nuevos y antiguos. Las "avalanchas" de agua-nieve** con volúmenes de unos pocos m³ bajaron por las principales cuencas y contribuyeron en menor grado a la formación de lahares.

En total según las estimaciones realizadas por Thouret et al, 1990 y 2007 el glaciar sobre el volcán Nevado del Ruiz perdió una área igual a 16% y un volumen igual al 9% del volumen total de nieve y hielo. Según Naranjo (comunicación personal) la erupción del Nevado del Ruiz tuvo una magnitud que se hallaría entre las erupciones de 1864 y

ca.1550.

Dada la variabilidad en magnitud de las erupciones explosivas del Mocho-Choshuenco se ha decidido modelizar los escenarios correspondientes a los tres últimos eventos importantes de los cuales se tienen datos de terreno bien contrastados. Estos eventos corresponden (de menor a mayor magnitud) a los eventos 1864, ca. 1550 y Enco, definidos respectivamente como escenario 1, escenario 2 y escenario 3. Si realizamos la correlación entre el Nevado del Ruíz y el Mocho-Choshuenco es presumible que el escenario 1 fundiera una cantidad de hielo y nieve menor que la erupción de 1985 del Nevado del Ruíz; en el escenario 2 la fusión sería mayor y en el escenario 3 mucho más importante. De esta manera los porcentajes de fusión para cada escenario serían los siguientes:

- Escenario 1 (erupción tipo 1864): erupción vulcaniana con desarrollo importante de piroclastos (flujos, oleadas y caída) y avalanchas mixtas, algo menor a la del Nevado del Ruíz de 1985, y que fundiría una cantidad de hielo y nieve del orden del 12% en área y 7% en volumen del total existente en la actualidad.
- Escenario 2 (erupción tipo ca. 1550): erupción vulcaniana con desarrollo importante de piroclastos (flujos, oleadas y caída) y avalanchas mixtas, algo mayor a la del Nevado del Ruíz de 1985, y que fundiría una cantidad de hielo y nieve del orden del 22% en área y 13% en volumen del total existente en la actualidad.
- Escenario 3 (erupción tipo Enco): erupción Vulcaniana-Pliniana con desarrollo importante de piroclastos (flujos, oleadas y caída) y avalanchas mixtas, y avalanchas mixtas, bastante más importante que la del Nevado del Ruíz, y que fundiría una cantidad de hielo y nieve del orden del 30% en área y 17% en volumen del total existente en la actualidad.

3.5.8.2. **Escenario 4: Erupción efusiva**

Según la historia geológica del volcán Mocho-Choshuenco no hay evidencias de que en las últimas erupciones se hayan producido coladas de lava. Si bien en las unidades más antiguas sí que hay lavas documentadas, pareciera que actualmente el volcán se

encuentra en una fase más explosiva. Por todo ello no parece probable que se dé una erupción efusiva con emisión de coladas de lava, sin embargo hemos considerado conveniente modelar este escenario debido a que en épocas anteriores sí que se han producido y también como ejercicio que permita tener un orden de magnitud de posibles lahares producidos por coladas de lava.

Según Wilson y Head (2007) la interacción entre una erupción efusiva y el hielo situado en la cima de un volcán puede ocurrir de tres maneras: (1) erupción subglacial que aprovecha grietas en el hielo formando un dique que puede llegar hasta la superficie y producir una depresión en la superficie del hielo, (2) erupción subglacial en la cual la lava **corre por el contacto entre la roca y la base del glaciar adoptando una forma de "sill"** y que puede excavar un túnel en el hielo, y (3) erupción fuera del glaciar (en el cono volcánico por ejemplo) y la colada de lava discurre por sobre el glaciar fundiendo hielo a su paso.

Según todos los indicios las últimas erupciones del complejo volcánico han debido ocurrir desde el cono actual del Mocho (unidad Mocho 5), por ello consideramos que de los tres procesos indicados por Wilson y Head el que mejor modelaría una erupción de este tipo es el caso 3. De esta manera el escenario se definiría como una erupción efusiva desde la cima del Mocho que emitiría una colada andesítica o andesítico-dacítica que correría sobre el hielo fundiendo una cantidad de hielo/nieve en un espacio de tiempo determinado.

Según Hugo Moreno (comunicación personal), basándose en las observaciones del volcán Villarrica, el que una colada de lava funda suficiente cantidad de hielo/nieve de manera lo suficientemente rápida como para producir lahares, está directamente relacionado con la tasa de emisión de lava. Según este autor en el volcán Villarrica la tasa de emisión de lavas capaz de producir lahares se estima en $100 \text{ m}^3/\text{s}$. La tasa de emisión también tiene influencia directa sobre el área ocupada por la lava y sobre la velocidad de desplazamiento del flujo (junto con la pendiente). Asumiendo una tasa de emisión importante se estima que la colada puede llegar a fundir todo el espesor de hielo, siendo este el peor caso ya que el volumen de agua fundido es máximo. Para estimar el área de contacto se ha definido para cada cuenca analizada una trayectoria posible de una colada con diversas ramificaciones que simulan la subdivisión del flujo en diversos brazos. En la Fig. 3.5.8.2-A se muestra un ejemplo del caso simulado.

El otro factor importante es el tiempo en que es fundido todo ese volumen de hielo. Según Edwards et al. (2013) un flujo de lava de composición basáltica circulando sobre hielo en una pendiente de 5° a 10° alcanza una velocidad de entre 5 y 10 cm/s. Las pendientes en la zona de la caldera (zona englaciada) del Mocho-Choshuenco son del mismo orden, si bien la composición de una lava andesítica la hace más viscosa y por tanto se estima que su velocidad será algo menor. En el capítulo 3.5.11.3, donde se detallan la estimación de volúmenes para cada escenario y se definen posibles trayectorias estimadas de las coladas.



Fig. 3.5.8.2-A. Ejemplo de erupción de coladas de lava fluyendo sobre hielo y dividiéndose en diferentes ramas. Obsérvese la amplia depresión formada en el hielo. Volcán Veniaminof, Alaska. Erupción de 1983 (fuente USGS).

3.5.9. Definición de Zonas Críticas de Riesgo

Los objetivos del proyecto se encaminan a levantar y elaborar estudios geológicos y

volcanológicos para caracterizar los lahares del volcán Mocho-Choshuenco en las áreas que mayor riesgo presenten para la población y la infraestructura presente en la zona.

El estudio de peligros de lahares se centra en el cráter del volcán Mocho y comprende los cauces principales que bajan desde su cima, es decir (empezando por el Norte y en sentido horario): estero Punahue, quebrada sin nombre N (Norte, entre estero Punahue y río Triful), río Triful, quebrada sin nombre NE (Noreste, entre río Triful y quebrada Honda), río Blanco-Pillanleufú, río Mocho, río Chico, río Blanco y estero Pirinel. En las Figuras 3.5.9-A y B se detallan el área de estudio con indicación de los principales cauces, centros habitados y otras infraestructuras presentes. No se han evaluado los cauces de los ríos Caunahue y Florín porque no nacen en el volcán y los lahares no pueden superar las divisorias de aguas que los separan de los cauces que si nacen en el cono. En el mapa de peligros del complejo volcánico (Moreno y Naranjo, 2006) tampoco son considerados estos cauces como de peligro por lahares.

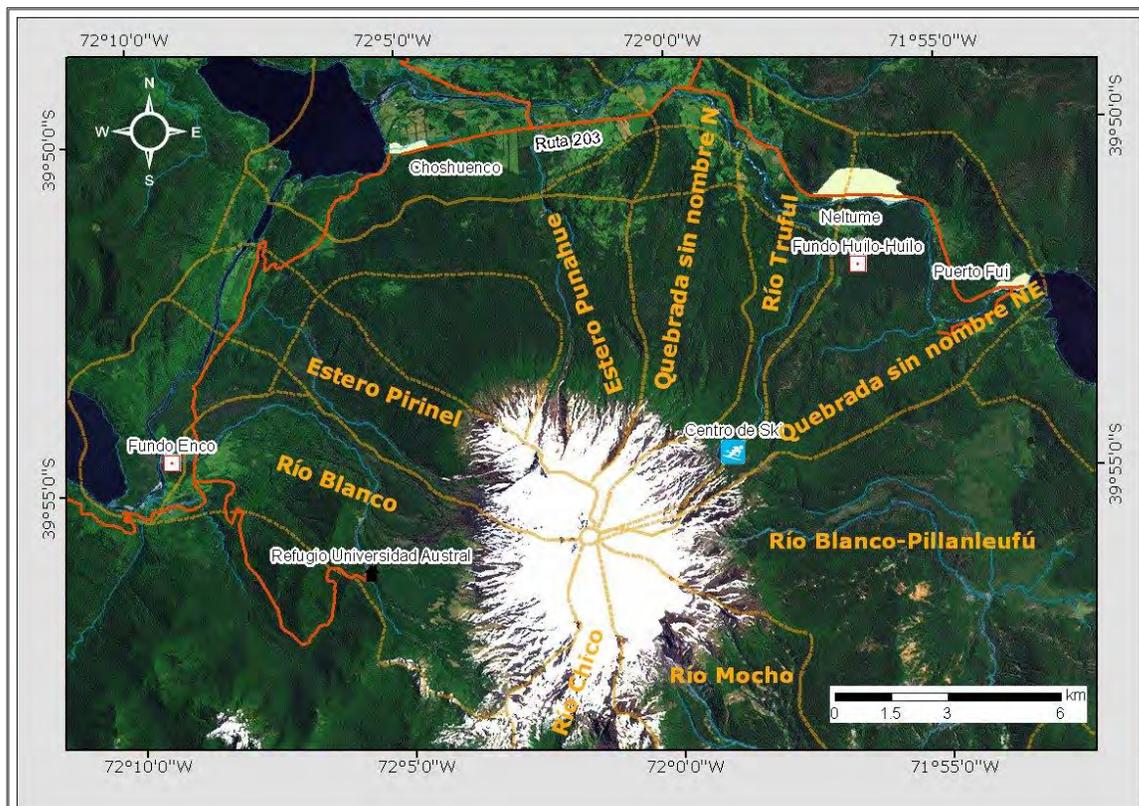


Fig. 3.5.9-A. División del complejo volcánico Mocho-Choshuenco en cuencas de los principales cauces que descienden por sus laderas con indicación de los principales núcleos habitados, carreteras principales e infraestructura ubicada en la zona (sectores Este, Norte y Oeste).



Fig. 3.5.9-B. División del complejo volcánico Mocho-Choshuenco en cuencas de los principales cauces que descienden por sus laderas con indicación de los principales núcleos habitados, carreteras principales e infraestructura ubicada en la zona (valle del río Blanco-Pillanleufú).

Los principales núcleos habitados en las cuencas de los cauces indicados con anterioridad se recogen en la Tabla 3.5.9-A.

Tabla 3.5.9-A. Principales núcleos habitados.

Núcleo	Habitantes (Censo 2002)	Comuna	Cuenca
Neltume	2125	Panguipulli	Quebrada Honda
			Triful
Puerto Fuy	391	Panguipulli	Quebrada Honda
Choshuenco	625	Panguipulli	Quebrada Honda
			Triful Punahue
Puerto Mahiue	1487		Blanco-Pillanleufú
		Futrono	Mocho Chico

En cuanto a otras infraestructural presentes en la zona y que pudieran ser afectados por lahares destacan el refugio de la universidad Austral, las instalaciones de CONAF y el fundo Enco en el sector del río Blanco y del estero Pirinel; la ruta internacional 203 al norte del volcán; el centro de ski e instalaciones turísticas del fundo Huilo-Huilo en el sector de las quebrada Honda, río Triful y río Blanco-Pillanleufú; el fundo Arquihue y la ruta T-559 en el sector del río Blanco-Pillanleufú además de una vivienda en la unión del río Chico con el Blanco-Pillanleufú.

De todo lo anterior se deduce que la zona con mayor población e infraestructura con posibilidad de ser afectado por lahares se halla al norte del volcán, en las cuencas del estero Punahue, río Triful, quebrada Honda y parte alta del río Blanco-Pillanleufú, por lo que todo este sector se considera como zona crítica de riesgo. También se considera zona crítica de riesgo el valle inferior del río Blanco-Pillanleufú donde se encuentra Puerto Maihue y otras infraestructuras. La zona de Enco (río Blanco y estero Pirinel) se considera con un riesgo medio ya que el número de personas expuestas es menor.

3.5.10. Caracterización Lahares Volcán Mocho-Choshuenco

Aunque no se dispone de datos que certifiquen de manera inequívoca la ocurrencia de lahares en el volcán Mocho-Choshuenco es bastante seguro que estos debieron ocurrir. La no existencia de datos históricos se atribuye a la no ocurrencia de erupciones recientes y a lo remoto de la región. Con la intención de buscar posibles sedimentos correspondientes a lahares se hizo una visita a la zona.

El mapa geológico de Moreno y Lara (2007) cartografía dos sectores que los autores atribuyen a sedimento laháricos (ver Fig. 3.5.6.5.1-A). El primero se halla al norte del volcán, en el punto donde el estero Punahue surge de las faldas del volcán hacia el llano donde se ubica la población de Choshuenco, hasta unirse al río Llanquihue. Corresponde a una extensión de aproximadamente dos kilómetros de largo y unos 400 metros de ancho que discurre a ambos lados del cauce del estero. El otro sector se encuentra en la zona de Enco y corresponde a sedimentos que habrían bajado por el río Blanco y el estero Pirinel.

Durante la visita a terreno se pudo comprobar la escasez de afloramientos de sedimentos atribuibles a lahares y además estos se encontraban bastante dispersos, lo que hace prácticamente imposible cartografiarlos o estimar los puntos de inicio de depositación, ni los de máxima extensión (valor de entrada de MSF). Más si tenemos en cuenta que no se realizó ningún tipo de prospección (sondajes, calicatas) ni ensayos de laboratorio que permitieran diferenciar entre sedimentos de lahares y los correspondientes a otros procesos de remoción en masa (deslizamientos, flujos de detritos). Esta escasez de afloramientos se atribuye principalmente a que parte de ellos se encuentren cubiertos por vegetación (los sedimentos laháricos favorecen la implantación de vegetación sobre ellos) y sobre todo a que al tratarse de sedimentos fácilmente erosionables estos puedan haber desaparecido. Ambos procesos se ven favorecidos de manera importante por el hecho de que ha pasado mucho tiempo desde la última erupción.

Debido a toda esta problemática se optó por visitar la zona tomando fotografías y georreferenciando los puntos donde se encuentran afloramiento de sedimentos correspondientes a flujos, algunos de los cuales pueden atribuirse a lahares. A partir de los ejemplos observados en terreno se ha inferido el comportamiento reológico de los lahares ocurridos en el Mocho-Choshuenco. Los criterios para estimar el comportamiento del flujo se basan en las estructuras sedimentarias observadas, tamaños de grano,

granoselección, gradación y de la angulosidad de los clastos. En base a todo ello se ha estimado el comportamiento del flujo que los depositó; es decir, si se trataba de un flujo de detritos, de un flujo hiperconcentrado o del flujo normal de un río.

Se han revisado un total de 5 cauces en busca de depósitos laháricos, río Blanco, estero Punahue, río Triful, quebrada Honda y río Blanco-Pillanleufú. En total se han realizado 27 puntos de muestreo que han sido georreferenciados, fotografiados y descrito el material encontrado. En las Figs. 3.5.10-A y B se muestran su ubicación. En el Anexo 8 se muestran las fotografías tomadas.

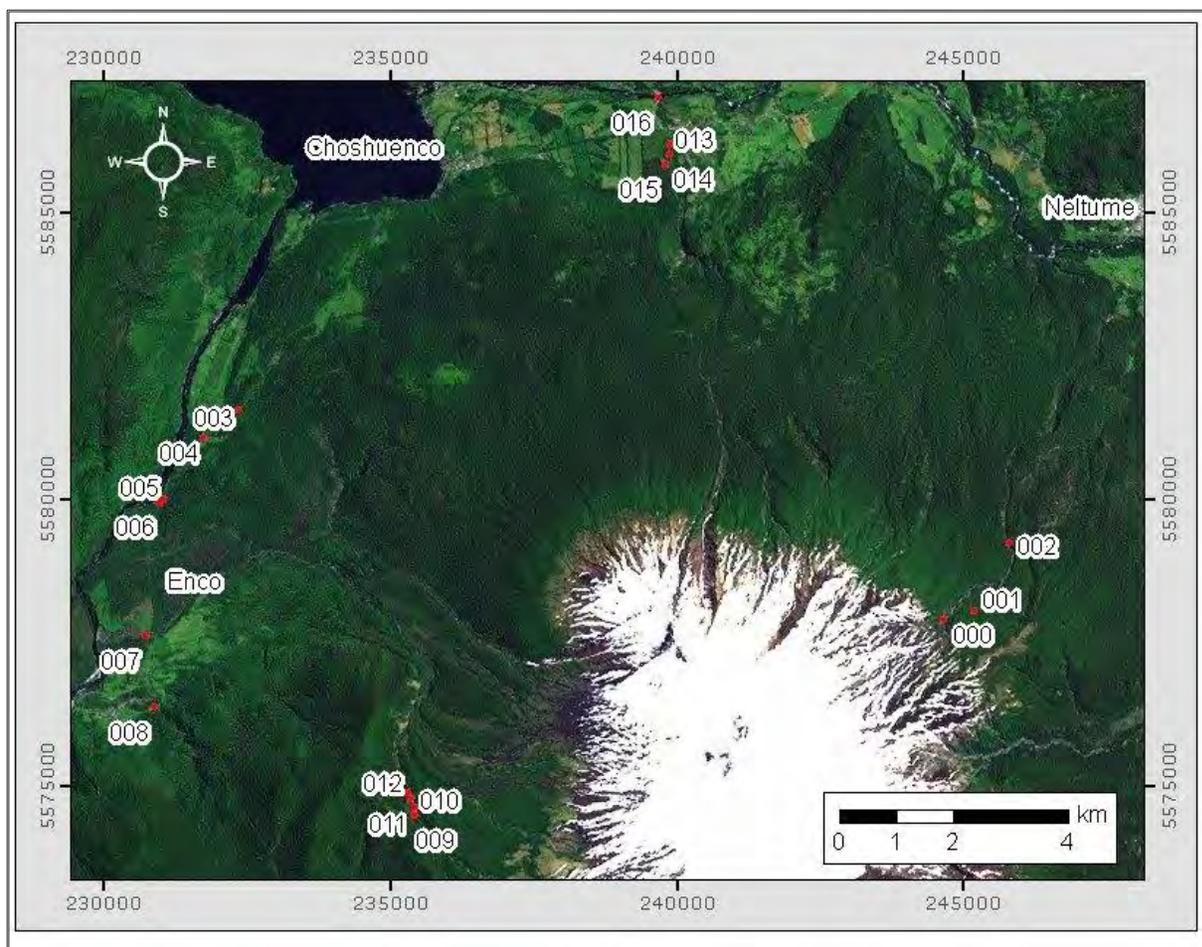


Fig. 3.5.10-A. Ubicación de las localidades tomadas al este, norte y oeste del complejo volcánico.

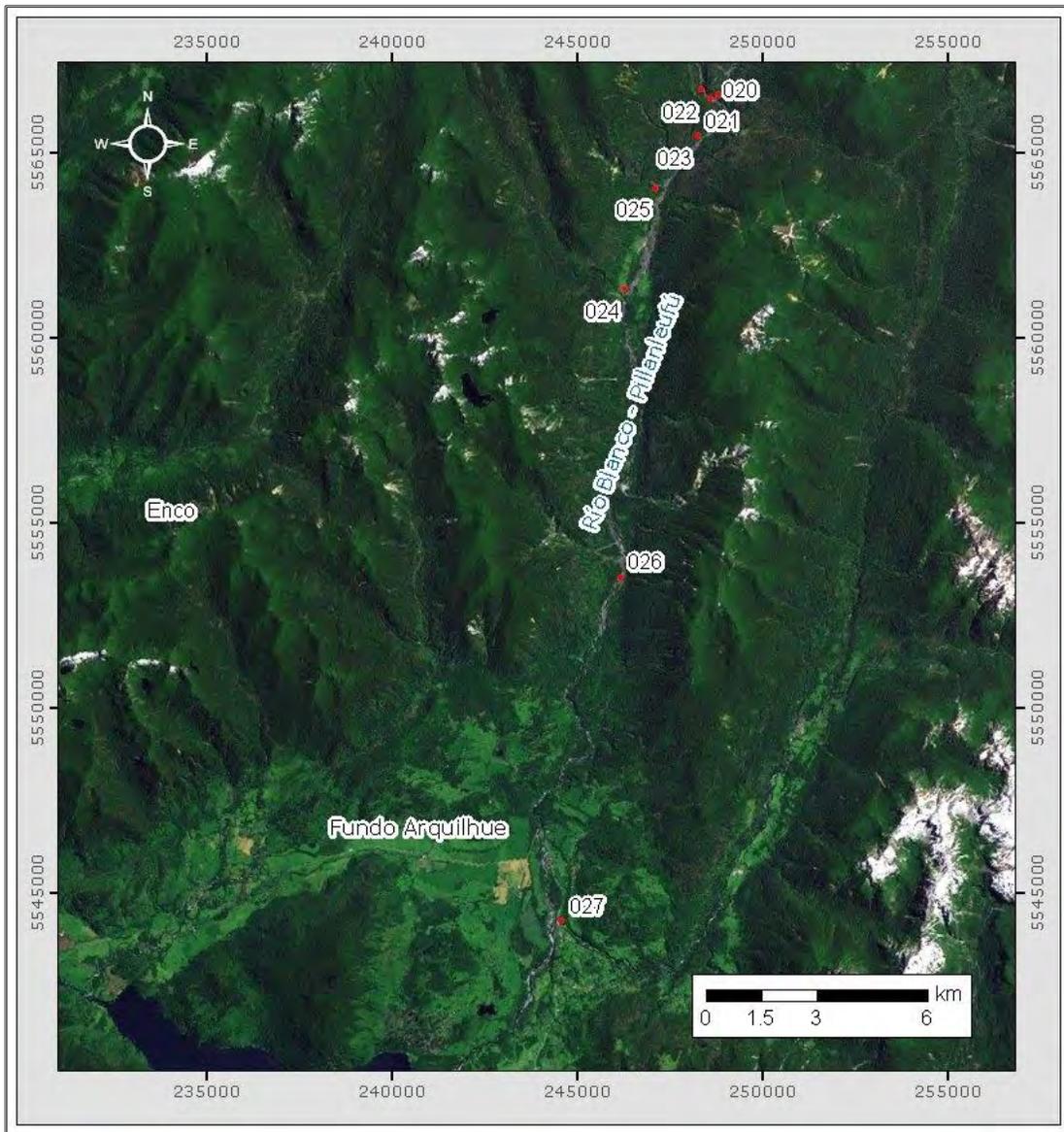


Fig. 3.5.10-B. Ubicación de las localidades tomadas en el valle del río Blanco-Pillanleufú.

3.5.10.1. **Reología Flujos Laháricos**

A partir de la revisión de los cauces realizada y de la descripción de los depósitos se ha evaluado la ocurrencia de lahares en cada uno de los cursos estudiados y se ha estimado la reología del flujo a partir de las facies identificadas, de forma descriptiva y cualitativa. Dado que no se han realizado ensayos de laboratorio no se han podido determinar parámetros reológicos de los flujos con datos cuantitativos (densidad, viscosidad,

esfuerzo de cizalla basal,...).

Según diversos autores (Pierson y Scott, 1985; Castruccio, 2008) los flujos laháricos suelen sufrir un proceso de dilución a medida que bajan por las laderas del volcán. En una secuencia ideal en la parte alta el lahar comienza con agua recién fundida que arrastra escasos sedimentos, a medida que baja por la ladera va ganando volumen a partir de los materiales sueltos **disponibles (morrenas glaciares, depósitos piroclásticos,...)**, con lo cual aumenta la proporción relativa de sólidos y con ello su densidad. Como resultado de ello el flujo tiene un comportamiento de flujo en masa y tiene las características de un flujo de detritos. A medida que nos alejamos del volcán y el flujo comienza a perder energía **(por disminución de la pendiente, pérdida de confinamiento,...)** pierde capacidad de transporte y comienza a depositar sedimento. Debido a esto y a la entrada de agua proveniente del propio cauce por donde discurre el flujo se diluye, disminuyendo la proporción relativa de sólidos/fluido. El comportamiento del flujo varía, transformándose en un flujo hiperconcentrado. Si el proceso continúa el flujo puede evolucionar hacia un flujo fluvial normal.

Determinar si en un volcán los lahares tienen un comportamiento de flujo hiperconcentrado o de flujo de detritos nos permite estimar la proporción relativa de sólidos que transportaba y a partir de las estimaciones de agua fundida (ver capítulo 3.5.11.3) podemos calcular el volumen total de los lahares que bajan por cada cauce.

Debido a la escasez de afloramientos ha sido imposible evaluar la reología de los flujos a lo largo de un cauce completo por lo que ha tenido que evaluarse a partir de la distancia al cono volcánico. De esta manera los afloramientos atribuibles a lahares se pueden agrupar en aquellos más cercanos al cono (facies proximales) y los más alejados (facies distales). En las Figs. 3.5.10.1-A, B y C se muestran fotografías tomadas en 3 puntos que corresponden a puntos cercanos al cono volcánico.



Fig. 3.5.10.1-A. Localidad 1 donde se observan sedimentos laháricos. Parte alta de la cuenca del río Triful.



Fig. 3.5.10.1-B. Localidad 11 donde se observan sedimentos laháricos formando un nivel aterrazado junto al río Blanco (sector refugio universidad Austral).



Fig. 3.5.10.1-C. Localidad 14 donde se observan sedimentos laháricos en el sector del estero Punahue.

De la observación de estas tres figuras se observa que corresponden a gravas de entre 3 y 15 cm con algún clasto de mayor tamaño, envueltas en una matriz arenosa de color gris negruzco. Los cantos son polimícticos y presentan bordes subredondeados aunque se observa la presencia de alguno más redondeado. Se trata de sedimentos mal clasificados, sin gradación observable y de aspecto masivo, todas ellas características de flujos de detritos, si bien es de remarcar que se trata de depósitos matrizsoportados lo cual indica una presencia importante de agua. Por lo que se podría deducir que se trata de un flujo con una proporción de sólidos/fluido cercana al límite entre flujos de detritos y flujos hiperconcentrados (66 % en volumen de sólidos).

En las Figs. 3.5.10.1-D y E se muestran fotografías tomadas en 2 puntos que corresponden a puntos más alejados del cono volcánico.



Fig. 3.5.10.1-D. Localidad 18 donde se observan sedimentos laháricos de flujo hiperconcentrado en el valle del río Blanco-Pillanleufú.



Fig. 3.5.10.1-E. Localidad 23 donde se observan sedimentos laháricos en el valle del río Blanco-Pillanleufú.

En ambas fotografías se observa que la proporción de gravas ha disminuido de manera considerable y muchos tramos solo hay arena con algunos cantos. La otra característica que llama fuertemente la atención es la presencia de laminación paralela. Los cantos también se encuentran subredondeados y su tamaño medio ha disminuido, aunque todavía se observan cantos de tamaño considerable. En algunos puntos se puede observar una imbricación de cantos incipiente. Aunque la selección de granos es mejor que en las fotografías anteriores siguen siendo depósitos mal clasificados. Todas estas características son indicativas de flujos hiperconcentrados, por lo que el lahar ya ha sufrido una dilución importante.

De acuerdo a las características morfológicas, texturas, estructuras sedimentarias y granulometría de los depósitos, se han podido determinar algunos de los principales mecanismos de generación, transporte y emplazamiento de los lahares producidos en el entorno del volcán Mocho-Choshuenco. Los sedimentos encontrados tienen bastante

similitud con los del volcán Villarrica resultado de la erupción de 1971. Por ello y por la proximidad entre ambos volcanes es factible pensar que el comportamiento de los lahares tiene características similares, todo ello a pesar que ambos volcanes presentan tipologías eruptivas bastante diferentes.

En el volcán Villarrica los lahares se generaron debido al súbito derretimiento de hielo y nieve producido por las altas tasas de emisión de lava, en el caso del Mocho-Choshuenco es más probable que la fusión se deba a flujos, oleadas de piroclastos y deslizamientos de hielo provocado por la erupción, tal y como ocurrió en la erupción del Nevado del Ruíz de 1985.

Según Castruccio (2008), en el volcán Villarrica el agua, al escurrir por las laderas del volcán, erosionó e incorporó sedimento, convirtiéndose en un flujo con características intermedias entre flujo de detritos e hiperconcentrado, con un alto grado de turbulencia, producto de la alta velocidad, cantidad de agua y la baja proporción de material fino (limo + arcilla). Estos flujos se movilizaron en varios pulsos u oleadas, producto de la inestabilidad característica de los flujos, así como por el carácter de las erupciones, desarrolladas en varios episodios con una mayor actividad. Los flujos estaban compuestos por una cabeza con alta concentración de bloques de gran tamaño, producto de la segregación interna que ocurre en el flujo, y un cuerpo y cola que tienen una mayor cantidad de agua y menor concentración de sedimentos de gran tamaño. La depositación de los flujos ocurrió de una manera acrecional, dominada por la tracción y arrastre de partículas en la interfase de depositación.

Según las observaciones realizadas en terreno, estimamos que en el volcán Mocho-Choshuenco los lahares tendrían un comportamiento similar, actuando principalmente como flujos hiperconcentrados, lo cual permite estimar que la concentración de sólidos variará entre los límites teóricos máximo y mínimo para este tipo de flujos; es decir, entre un 66% y un 20% respectivamente.

3.5.11. Estimación de volúmenes de lahares

3.5.11.1. Manto de nieve

3.5.11.1.1 Antecedentes y descripción del manto de nieve

El volcán Mocho-Choshuenco tiene una cobertura nival que alimenta al glaciar, la cual se extiende normalmente entre mayo y octubre, este manto de nieve puede aumentar de manera significativa el flujo de un posible lahar en caso de suceder durante la temporada invernal.

No existen registros periódicos de alturas de nieve en el volcán pero sí que existen datos de acumulación anual de nieve en equivalente de agua. Estos datos se enmarcan dentro de los estudios glaciológicos llevados a cabo por Casassa et al 2004. En concreto se dispone de los datos de los años hidrológicos 2003-2004, 2004-2005, 2005-2006, 2009-2010, 2010-2011, 2011-2012 y 2012-2013. Dentro de esta serie el año con mayor acumulación corresponde al 2009-2010.

Los datos de altura de nieve fueron recopilados en las balizas de medición de ablación, que se encuentran distribuidas por toda la extensión del glaciar Mocho, situado al sudeste del cono. En la Fig. 3.5.11.1.1-A se recoge la distribución de dichas balizas. La baliza 9 es la situada a menor cota y se encuentra a 1704 m s.n.m. La cota inferior del manto de nieve invernal se sitúa aproximadamente a unos 1000 m s.n.m por lo que entre la cota 1000 y 1700 no se disponen datos de altura de nieve.

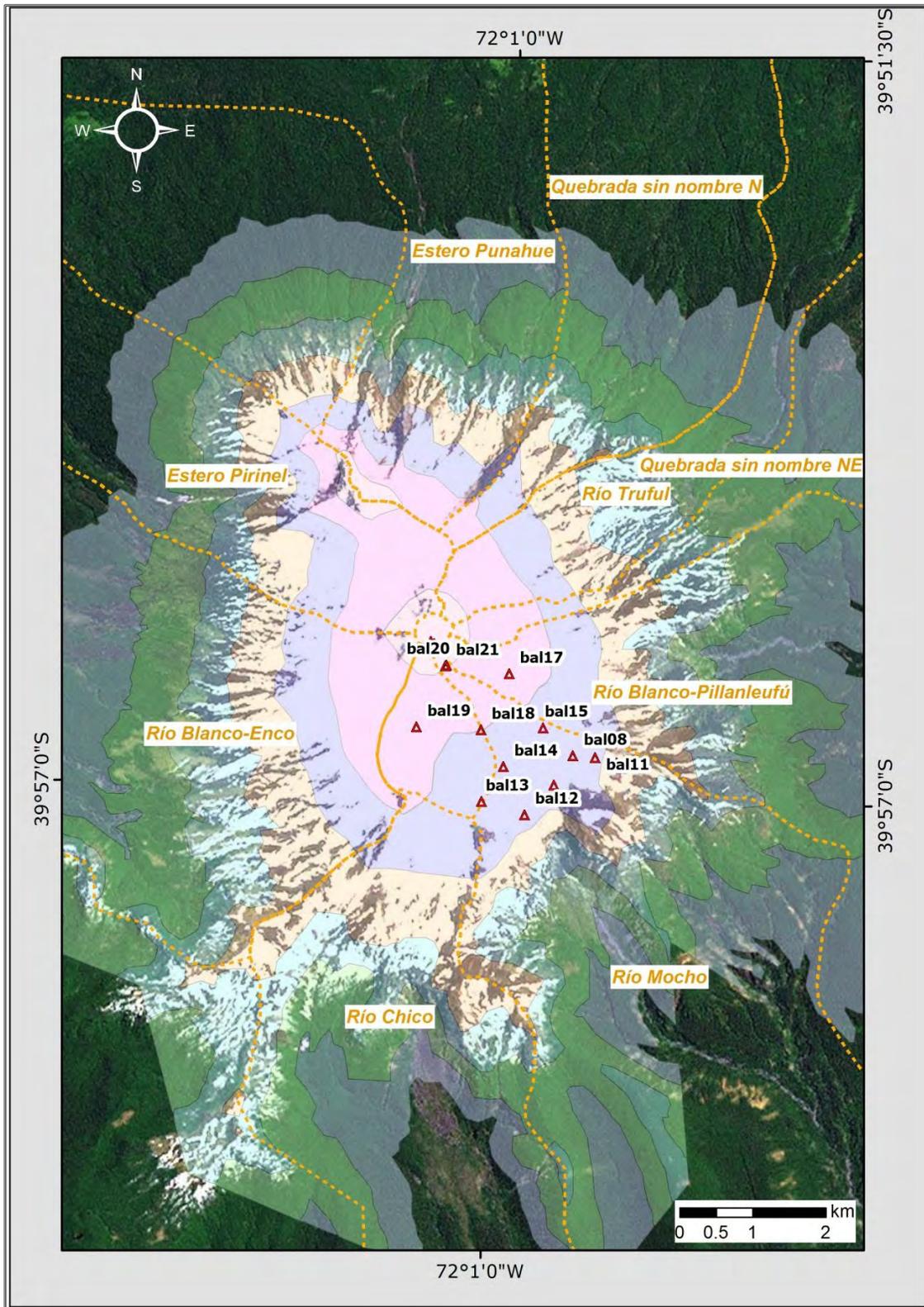


Fig. 3.5.11.1.1-A. Franjas de 200 m de cota en las que se ha subdividido el manto de nieve invernal.

3.5.11.1.2 Estimación del manto de nieve

Para calcular el volumen de agua máxima que puede aportar el manto nival a los lahares, se estimó el manto nival máximo correspondiente al año 2009, año de mayor acumulación de los datos utilizados, que corresponden a los datos de acumulación anual de nieve (equivalente en agua) obtenidos por Casassa et al entre los años 2003 y 2013, en las balizas de medición de ablación del glaciar Mocho.

Dichas balizas se encuentran distribuidas por toda la extensión del glaciar, a diferentes cotas. Esto permitió dividir el glaciar en franjas de 200 m de cota, utilizando el modelo de elevación digital (DEM) de este estudio (ver apartado 3.5.12.1), y calcular la acumulación media de precipitación de nieve de las balizas incluidas en cada franja. Al multiplicar este valor por el área de cada franja podemos calcular el volumen total de agua en forma de nieve disponible para fundir en caso de erupción. Al utilizar los datos de acumulación total anual se dispone del volumen máximo de agua que correspondería al final del período invernal. En la Fig. 3.5.11.1.1-A se muestran las franjas en las que se ha dividido el manto de nieve invernal.

Tal como se ha indicado con anterioridad no se disponen datos de acumulación de nieve entre las cotas 1700 y 1000. Para estimar estas acumulaciones se ha procedido a correlacionar la acumulación media en cada franja con su cota media y a partir de ella se ha extrapolado la acumulación de las franjas sin datos. En la Fig. 3.5.11.1.2-A se muestra la correlación y la extrapolación realizada.

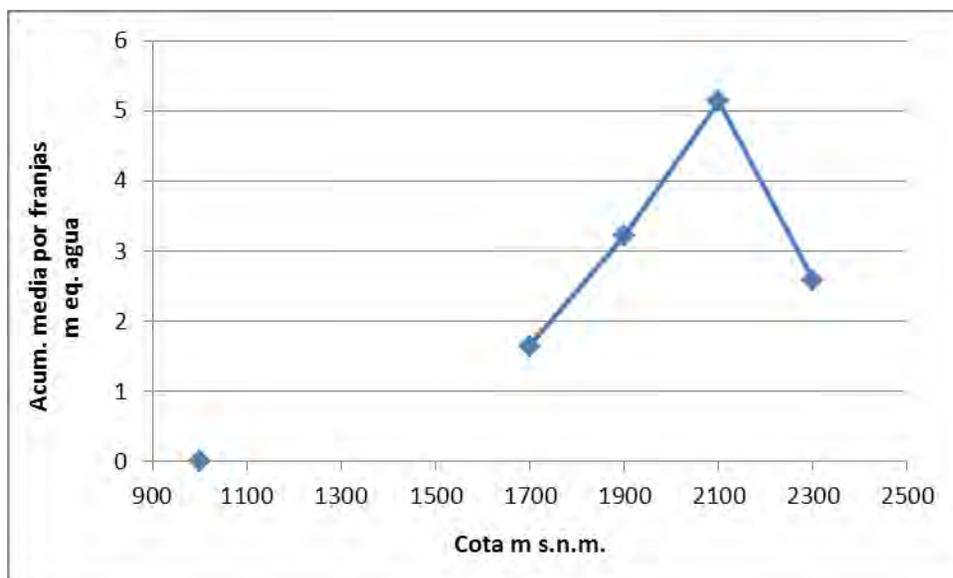


Fig. 3.5.11.1.2-A: Correlación acumulación media por franjas con la cota.

En la Tabla 3.5.11.1.1-A se recoge la acumulación media para cada franja en el año 2009-2010.

Tabla 3.5.11.1.1-A. Acumulación media por franja en año 2009-2010 y volumen total de agua en forma de nieve disponible para fundir.

Franja	Área (km ²)	Ac. Media (m eq. de agua)	Volumen de agua (10 ⁶ *m ³)
1000-1200	49,39	0,25	12,35
1200-1400	36,31	0,7	25,42
1400-1600	23,47	1,2	28,16
1600-1800	16,56	1,64	27,16
1800-2000	12,24	3,22	39,41
2000-2200	8,9	5,13	45,66

Franja	Área (km²)	Ac. Media (m eq. de agua)	Volumen de agua (10⁶*m³)
2200-2422	1,38	2,59	3,57

El volumen total de nieve en las cuencas estudiadas cuyas cabeceras parten del volcán Mocho-Choshuenco se presenta en la Tabla 3.5.11.1.1-B.

Tabla 3.5.11.1.1-B. Volumen de equivalente en agua por cuenca en forma de nieve.

Cuenca	Volumen de agua (10⁶*m³)
Estero Punahue	15,11
Quebrada sin nombre N	8,65
Río Triful	13,26
Quebrada sin nombre NE	4,70
Río Blanco-Pillanleufú	21,53
Río Mocho	29,10
Río Chico	25,32
Río Blanco	33,17
Estero Pirinel	23,49

3.5.11.2. **Glaciar**

3.5.11.2.1 Antecedentes y descripción del glaciar

La parte superior del volcán Mocho-Choshuenco se haya cubierta de glaciares en los 360° del cono, que fluyen radialmente en todas direcciones, Los glaciares cubren la gran depresión correspondiente a la caldera y solamente las caras sur y este del cono central, encontrándose las caras norte y oeste cubiertas por piroclastos,

Los trabajos realizados hasta ahora en los glaciares del Mocho-Choshuenco se centran en el glaciar Mocho, el mayor de todos, situado al sudeste del cono central, Estos trabajos han sido llevados a cabo por el equipo de Gino Casassa en el CECs de Valdivia desde el año 2003 y se han centrado en la variación del glaciar mediante el estudio del balance de masas y por comparación de fotografías satelitales,

Referente a la modelación de lahares los datos relevantes son los referentes a la superficie del glaciar, la cual se ha delimitado en base a la foto satelital World View 2 año 2012, y al espesor de hielo, Respecto a este último dato en el artículo **"Ice volumetric changes on active volcanoes in southern Chile"** (Rivera et al., 2006) se recogen perfiles RES centrados principalmente en el glaciar Mocho pero que también abarcan todo el entorno del glaciar, Según estos datos se puede deducir que los mayores espesores de hielo se encuentran al sur y sudeste del cono central (zona del glaciar Mocho y glaciar Sur), donde se dan valores generalmente superiores a 100 m y con un valor máximo de 270 m, Los valores de espesor son algo menores al este y norte (nacientes río Triful, esteros Punahue y Pirinel) pero también con espesores de más de 100 m, Los espesores menores se encuentran al oeste del volcán, en la cuenca del río Blanco-Enco, siendo los valores obtenidos en esta zona inferiores a 100.

3.5.11.2.2 Estimación de espesores y volumen de los glaciares

Para la estimación del volumen de hielo existente en el volcán se han utilizado los datos **obtenidos del proyecto "ESTUDIO DE ESTIMACION DE VOLÚMENES DE HIELO MEDIANTE SONDAJES DE RADAR EN ZONAS NORTE, CENTRAL Y SUR" de la DGA y llevado a cabo** por Geoestudios, Este proyecto pretende generar información de espesores de hielo en 18 glaciares repartidos por la geografía chilena, Entre ellos se encuentran los glaciares que recubren el volcán Mocho-Choshuenco por lo cual se solicitó permiso a la DGA para

utilizar dichos datos, ya que se considera un dato fundamental para la correcta realización de la modelación de lahares,

Se ha empleado un sistema de radar aéreo de última generación para medir el espesor de hielo en el volcán Mocho-Choshuenco, Este sistema es una modificación de los radares aéreos que han sido exitosamente aplicados en dos proyectos anteriores de la DGA (DGA, 2011; DGA, 2012) por parte del equipo de trabajo propuesto para este estudio, En efecto, participa en este estudio el Dr, Norbert Blindow de Alemania, geofísico inventor de los radares aéreos utilizados en los proyectos mencionados,

Los datos aéreos se validarán con mediciones mediante RES terrestre que se realizarán en este proyecto en el volcán Mocho-Choshuenco,

Tanto en el radar aéreo como en el terrestre (Casassa y Rivera, 1998) se transmite una onda electromagnética hacia el glaciar, la cual rebota en la base rocosa y es capturada por el receptor (Rx), El espesor se calcula a partir del tiempo (two-way travel time) que demora la onda transmitida en viajar entre el transmisor (Tx) y la base subglacial, y su posterior reflejo hacia el Rx, En el caso del radar aéreo el Rx y el Tx se ubican sobre una estructura de antena colgante a unos 20-50 m sobre la superficie, mientras que en el radar terrestre el Rx y Tx están localizados sobre la superficie,

El radar aéreo utilizado en el Mocho-Choshuenco será una modificación del modelo BGR-P30, de una frecuencia central de 30 MHz, diseñado por el Dr. Norbert Blindow, La experiencia adquirida por el Dr. Blindow y el Dr. Casassa en el desarrollo de los estudios de 2011 y 2012 (DGA, 2011 y 2012) en la Zona Centro de Chile indican que el radar aerotransportado BGR-P30 a una frecuencia central de 25 MHz, que tiene un peso de 350 kg incluyendo la electrónica y la estructura de antena, es adecuado para sondear el espesor de los glaciares temperados, tal como existen en el sur de la Zona Centro y en la Zona Sur,

Los distintos modelos del transmisor del radar aéreo son del tipo impulso y constan de una antena colgante tipo bow-tie, de aproximadamente 6x4x0,8 m y un peso de unos 350 kg para la frecuencia central de 25 MHz, El radar utiliza un transmisor que generan un pulso de 3000 Volts con una PRF (Pulse Repetition Frequency) de 5 kHz diseñado por el Ingeniero Bernhard Bömer de la Universidad de Münster En la antena se adiciona un

receptor GPS de doble frecuencia y un altímetro láser puntual que indica, por medio de un visor en cabina, en tiempo real, la altura de la antena sobre la superficie, En tierra se instala un recepto base GPS durante cada vuelo para posteriormente aplicar DGPS, A bordo se disponen dos computadores portátiles, uno para el sistema de navegación, y otro para la recepción de los datos del radar y el láser, La velocidad de crucero durante las mediciones debe ser del orden de 40 nudos, lo que asegura aproximadamente 1 traza de radar cada 2 m sobre el terreno, La altura de vuelo sobre el glaciar debe ser de 20 m a un máximo de 50 m medidos bajo la base de la antena de radar hacia la superficie de hielo.

La empresa Geoestudios cuenta con un radar terrestre de una frecuencia central de 6 MHz construido por la empresa Unmanned de Valdivia, Las antenas son dipolos simples cargados resistivamente, que se insertan en cintas tubulares de escalada, tiradas por 3 personas que transitan a pie a través de un glaciar, Las antenas empleadas tienen un largo de medio dipolo de 8 m, con una separación de 8 m entre las antenas Tx y Rx, vale decir el largo total de las antenas es de 40 m. El Tx levanta un pulso de una amplitud de unos 1000 V. El receptor es un conversor análogo-digital que es capaz de promediar hasta 1024 trazas. Típicamente se obtiene 1 traza promediada cada 2 segundos. La sincronía entre el Tx y el Rx la proveen sendos GS de frecuencia simple instalados respectivamente en el Rx y el Tx. El personal de Geoestudios tiene amplia experiencia en la medición de espesores de hielo mediante este radar terrestre, tanto en glaciares de la Zona Centro (cuencas del río Aconcagua y el río Maipo) como en glaciares de la Zona Sur (Volcán Villarrica).

Los datos generados en el proyecto "ESTUDIO DE ESTIMACION DE VOLÚMENES DE HIELO MEDIANTE SONDAJES DE RADAR EN ZONAS NORTE, CENTRAL Y SUR" de la DGA para el volcán Mocho-Choshuenco consisten en la realización de 6 perfiles radiales en helicóptero que cruzaban todo el volcán y dos terrestres en la zona del glaciar Mocho y que sirven para verificar los datos aéreos. Tras el análisis de los datos se pudo observar que muchos de los puntos tomados no permitían definir con claridad el fondo del hielo con lo cual se consideró que no aportaban datos fiables y se optó por no tenerlos en cuenta. También se hizo una revisión para eliminar datos incongruentes que ofrecían consistencia interna o con datos reales en terreno (zonas que en verano aflora la roca y a los que los datos daban espesor, atribuyéndose este a la nieve de temporada). En la Fig. 3.5.11.2.2-A se muestran los set de datos utilizados y su procedencia.

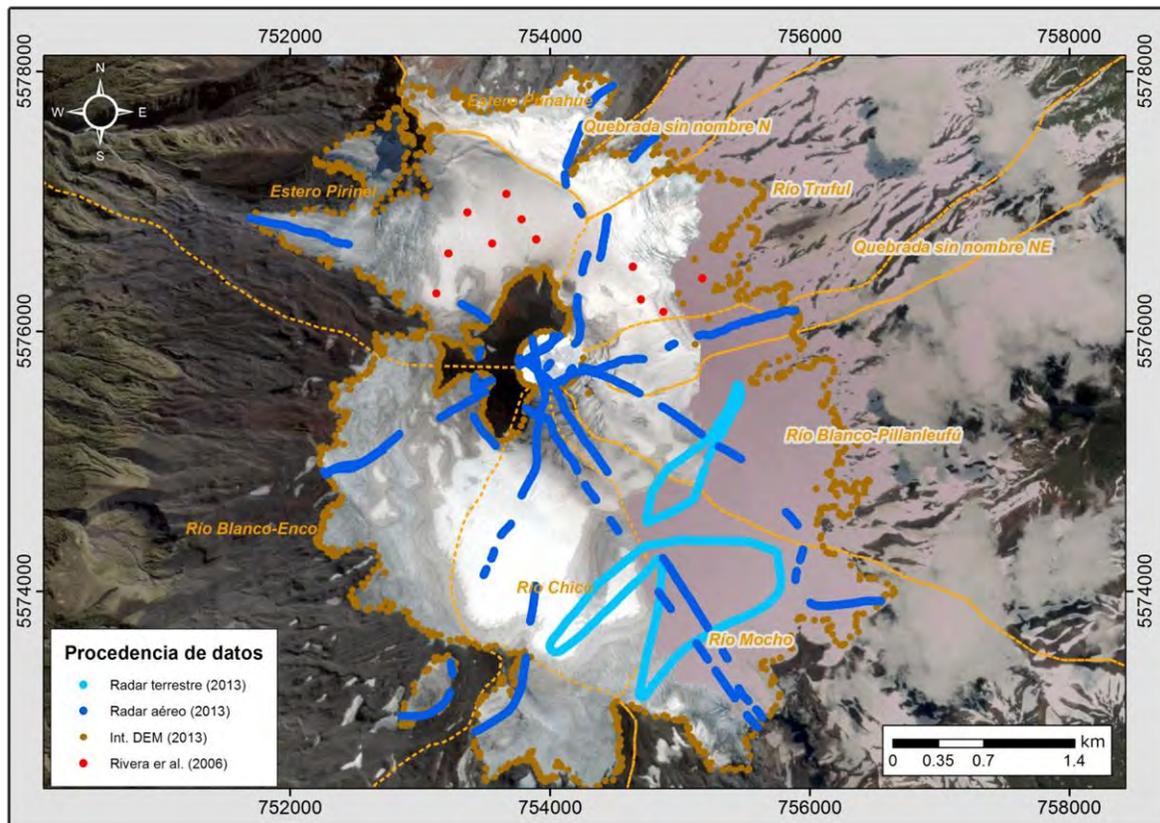


Fig. 3.5.11.2.2-A. Datos utilizados en la interpolación y procedencia de los datos.

Una vez corregidos los datos erróneos se calculó la cota del fondo rocoso restando el espesor obtenido (Fig. 3.5.11.2.2-B) en los perfiles de radar, del DEM topográfico. A partir del mismo DEM se calculó la cota del borde externo del glaciar, ya en roca. Con la nube de puntos obtenida se procedió a interpolar el fondo rocoso bajo el glaciar. Las pruebas realizadas mostraban resultados irreales en las zonas con pocos puntos al norte y noreste del cono. Por ello se decidió añadir puntos a partir de los datos de Rivera et al (2006) que permitiesen una mejor interpolación.

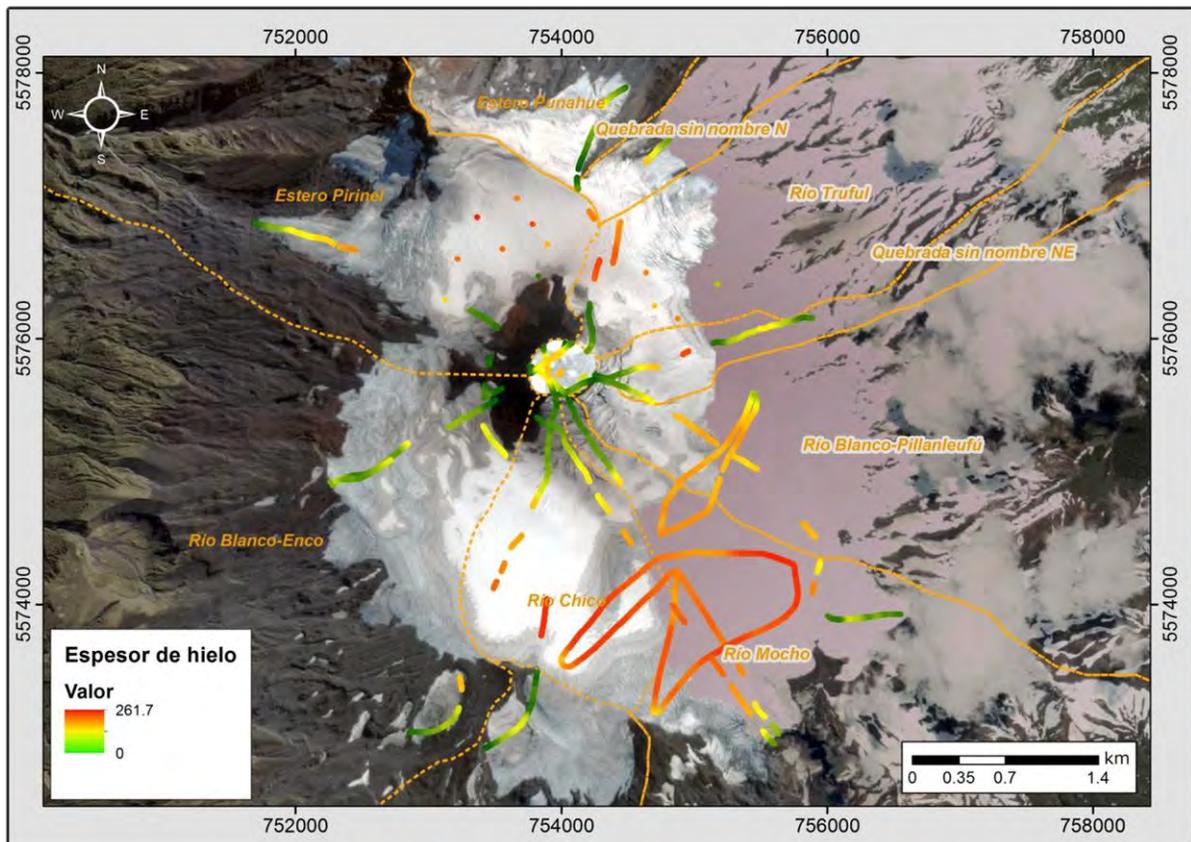


Fig. 3.5.11.2.2-B. Datos de espesor de hielo utilizados en la interpolación.

Para este proceso se realizaron pruebas con diferentes métodos de interpolación que ofrece el programa Arc Gis (*natural neighbor*, *IDW*, *Trend*, *Spline*, *TIN*,...). Tras la comparación de los resultados se pudo comprobar que el método que ofrece una topografía más natural es la interpolación mediante *natural neighbor*. En la Fig. 3.5.11.2.2-C se muestra el resultado obtenido.

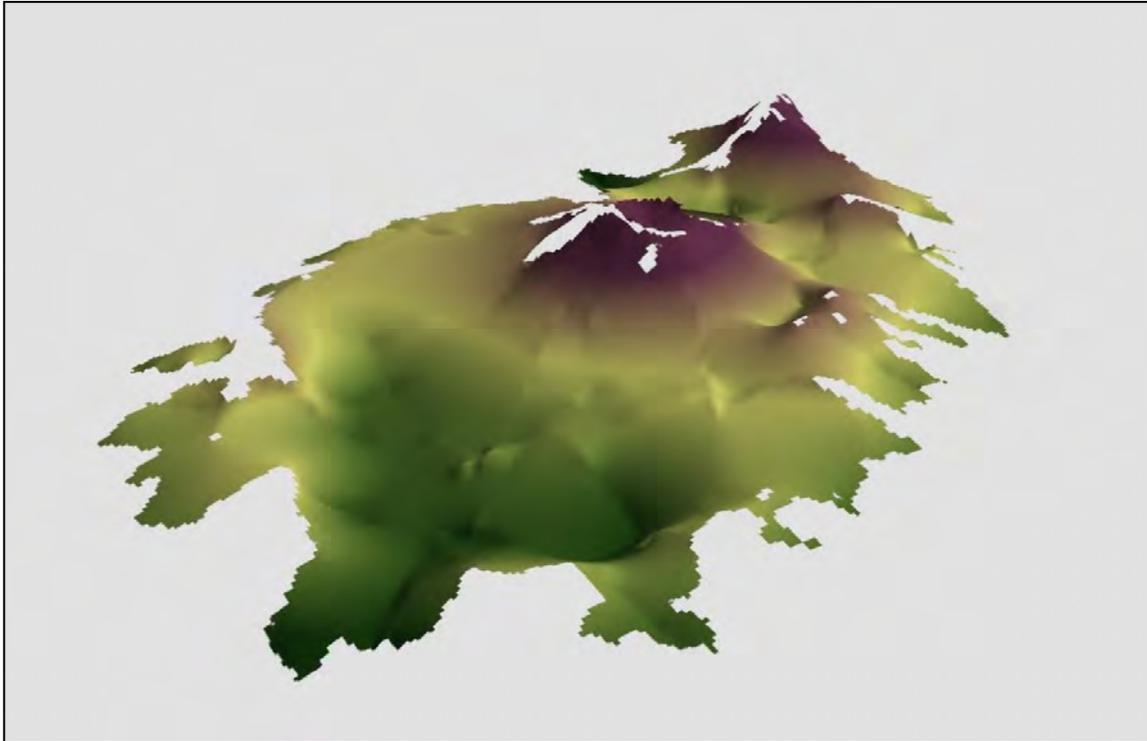


Fig. 3.5.11.2.2-C. Topografía del fondo de la caldera obtenida con interpolación *natural neighbor* (vista desde el Sudeste hacia el Noroeste), volcán Mocho en primer plano y volcán Choshuenco al fondo.

Las mediciones de radar fueron realizadas en octubre, momento en el cual sobre el glaciar existía una importante capa de nieve. Ante la imposibilidad de separar la capa de nieve respecto al hielo subyacente (el tránsito entre nieve y hielo se hace de manera gradual por lo cual no ofrece una superficie de reflexión buena para las ondas de los diferentes radares utilizados) se optó por dividir la superficie glaciar en las mismas bandas de cota realizadas para la estimación de nieve y asignar a cada una de ellas una densidad menor a la del hielo de manera que refleje la disminución del equivalente de agua producido por la presencia de nieve. En la Tabla 3.5.11.2.2-A se detallan las densidades atribuidas a cada banda y los equivalentes de agua calculados. En la Tabla 3.5.11.2.2-B se reflejan los mismos datos divididos por cuenca y banda de cota.

Tabla 3.5.11.2.2-A. Equivalente de agua por bandas de cota en la zona con glaciar.

Rango altitudinal	Espesor medio	Densidad media	h glaciar
m	m	g/cm³	m eq.a.
2200-2400	37,0	0,78	30,8
2000-2200	83,0	0,84	71,8
1800-2000	81,6	0,85	71,3
1600-1800	36,0	0,86	31,6

Tabla 3.5.11.2.2-B. Equivalente de agua por bandas de cota y cuenca en la zona con glaciar.

Cuenca	Franja	Volumen hielo y nieve (m³)	Densidad hielo y nieve	Volumen de agua (10⁶*m³)	
Río Blanco-Enco	1000-1200				
	1200-1400				
	1400-1600				
	1600-1800				
	1800-2000	10.718.798,98	0,85	9,11	
	2000-2200	78.249.569,55	0,84	65,73	Total
	2200-2422	40.642,70	0,78	0,03	74,87
Estero Pirinel	1000-1200				
	1200-1400				
	1400-1600				
	1600-1800	4.783.945,01	0,86	4,11	
	1800-2000	30.568.383,41	0,85	25,98	
	2000-2200	136.759.435,20	0,84	114,88	Total
	2200-2422	98.125,00	0,78	0,08	145,05
Estero Punahue	1000-1200				
	1200-1400				
	1400-1600				
	1600-1800				
	1800-2000	5.693.056,95	0,85	4,84	
	2000-2200	18.366.434,48	0,84	15,43	Total
	2200-2422	9.853.435,67	0,78	7,69	27,95

Cuenca	Franja	Volumen hielo y nieve (m³)	Densidad hielo y nieve	Volumen de agua (10⁶*m³)	
Queb. SNN	1000-1200				
	1200-1400				
	1400-1600				
	1600-1800				
	1800-2000	2.196.949,46	0,85	1,87	
	2000-2200	11.545.500,49	0,84	9,70	Total
	2200-2422				11,57
Río Triful	1000-1200				
	1200-1400				
	1400-1600				
	1600-1800	4.749,83	0,86	0,00	
	1800-2000	21.572.511,98	0,85	18,34	
	2000-2200	70.335.341,80	0,84	59,08	Total
	2200-2422	2.339.956,05	0,78	1,83	79,25
Queb. SNNE	1000-1200				
	1200-1400				
	1400-1600				
	1600-1800				
	1800-2000	2.923.550,84	0,85	2,49	
	2000-2200	33.547.229,00	0,84	28,18	Total
	2200-2422	1.620.006,56	0,78	1,26	31,93
Río Blanco - Pillanleufú	1000-1200				
	1200-1400				
	1400-1600				
	1600-1800	1.702,19	0,86	0,00	
	1800-2000	64.221.330,03	0,85	54,59	
	2000-2200	68.545.244,14	0,84	57,58	Total
	2200-2422	1.702.328,80	0,78	1,33	113,50
Río Mocho	1000-1200				
	1200-1400				
	1400-1600				
	1600-1800				
	1800-2000	391.195.596,24	0,85	332,52	
	2000-2200	200.246.992,19	0,84	168,21	Total

Cuenca	Franja	Volumen hielo y nieve (m³)	Densidad hielo y nieve	Volumen de agua (10⁶*m³)	
	2200-2422	3.171.052,86	0,78	2,47	503,20
Río Chico	1000-1200				
	1200-1400				
	1400-1600				
	1600-1800				
	1800-2000	149.715.891,57	0,85	127,26	
	2000-2200	168.661.273,42	0,84	141,68	Total
	2200-2422	1.916.611,18	0,78	1,49	270,43

Tal como se ha indicado las mediciones fueron realizadas en octubre por lo cual no se tienen datos de solo hielo que permitan calcular el equivalente de agua del escenario mínimo (sin nieve. a finales de verano). No obstante, considerando que este invierno de 2013 ha sido un año seco y que no todos los años la nieve de temporada desaparece al final del verano se decidió tomar los datos de octubre como los de escenario mínimo, considerando nieve solo sobre el glaciar. Esto implica que el equivalente de agua por cuenca para el escenario mínimo son los recogidos en la Tabla 3.5.11.2.2-B. asunción que queda por el lado de la seguridad ya que los volúmenes estimados son mayores. En cambio para la modelación del escenario máximo se optó por penalizar esos mismos datos de octubre añadiéndoles un 50% del equivalente de agua del invierno de 2009 (ver apartado 3.5.11.1) para la zona englaciar y contabilizar el 100% para la zona fuera del glaciar (hasta la cota 1000). Se optó por penalizar con el 50% porque se consideró como un valor razonable aplicar esa penalización sobre la precipitación máxima de la serie de datos disponible. De esta manera en la Tabla 3.5.11.2.2-B se recogen los datos de equivalente de agua para el escenario mínimo y en la Tabla 3.4.11.2.2-C los del escenario máximo, incluyendo las penalizaciones de nieve aplicadas.

Tabla 3.5.11.2.2-C. Equivalente de agua para escenario máximo.

Cuenca	Franja	Volumen hielo y nieve (m³)	Densidad hielo y nieve	Volumen de agua (10⁶*m³)	Factor penalización suma nieve	Suma nieve acumulada (10⁶*m³)	
Río Blanco -Enco	1000-1200				1,00	1,71	
	1200-1400				1,00	3,96	
	1400-1600				1,00	5,21	
	1600-1800				1,00	5,71	
	1800-2000	10.718.798,98	0,85	9,11	0,50	12,68	
	2000-2200	78.249.569,55	0,84	65,73	0,50	69,86	Total
	2200-2422	40.642,70	0,78	0,03	0,50	0,19	99,32
Estero Pirinel	1000-1200				1,00	0,41	
	1200-1400				1,00	1,14	
	1400-1600				1,00	1,82	
	1600-1800	4.783.945,01	0,86	4,11	1,00	6,82	
	1800-2000	30.568.383,41	0,85	25,98	0,80	29,61	
	2000-2200	136.759.435,20	0,84	114,88	0,50	120,46	Total
	2200-2422	98.125,00	0,78	0,08	0,50	0,71	160,97
Estero Punahue	1000-1200				1,00	0,53	
	1200-1400				1,00	1,27	
	1400-1600				1,00	1,88	
	1600-1800				1,00	2,25	
	1800-2000	5.693.056,95	0,85	4,84	0,50	6,99	
	2000-2200	18.366.434,48	0,84	15,43	0,50	17,62	Total
	2200-2422	9.853.435,67	0,78	7,69	0,50	7,93	38,47
Queb SNN	1000-1200				1,00	0,73	
	1200-1400				1,00	1,15	
	1400-1600				1,00	1,34	
	1600-1800				1,00	1,00	
	1800-2000	2.196.949,46	0,85	1,87	1,00	3,21	
	2000-2200	11.545.500,49	0,84	9,70	0,50	10,30	Total
	2200-2422						17,72
Río Triful	1000-1200				1,00	0,31	
	1200-1400				1,00	0,75	
	1400-1600				1,00	1,87	

Cuenca	Franja	Volumen hielo y nieve (m ³)	Densidad hielo y nieve	Volumen de agua (10 ⁶ *m ³)	Factor penalización suma nieve	Suma nieve acumulada (10 ⁶ *m ³)	
	1600-1800	4.749,83	0,86	0,00408	1,00	1,93	Total 87,66
	1800-2000	21.572.511,98	0,85	18,34	0,50	19,57	
	2000-2200	70.335.341,80	0,84	59,08	0,50	61,26	
	2200-2422	2.339.956,05	0,78	1,83	0,50	1,96	
Queb. SNNE	1000-1200				1,00	0,82	Total 36,01
	1200-1400				1,00	0,87	
	1400-1600				1,00	0,53	
	1600-1800				1,00	0,44	
	1800-2000	2.923.551	0,85	2,49	0,50	2,71	
	2000-2200	33.547.229	0,84	28,18	0,50	29,31	
	2200-2422	1.620.007	0,78	1,26	0,50	1,34	
Río Blanco - Pillanleufú	1000-1200				1,00	4,33	Total 132,35
	1200-1400				1,00	4,18	
	1400-1600				1,00	2,93	
	1600-1800	1.702	0,86	0,00146	1,00	2,93	
	1800-2000	64.221.330	0,85	54,59	0,50	56,73	
	2000-2200	68.545.244	0,84	57,58	0,50	59,81	
	2200-2422	1.702.329	0,78	1,33	0,50	1,44	
Río Mocho	1000-1200				1,00	1,37	Total 527,29
	1200-1400				1,00	4,79	
	1400-1600				1,00	4,19	
	1600-1800				1,00	3,71	
	1800-2000	391.195.596	0,85	332,52	0,50	337,75	
	2000-2200	200.246.992	0,84	168,21	0,50	172,78	
	2200-2422	3.171.053	0,78	2,47	0,50	2,69	
Río Chico	1000-1200				1,00	0,95	Total 290,29
	1200-1400				1,00	3,10	
	1400-1600				1,00	3,58	
	1600-1800				1,00	5,05	
	1800-2000	149.715.892	0,85	127,26	0,50	130,44	
	2000-2200	168.661.273	0,84	141,68	0,50	145,53	
	2200-2422	1.916.611,18	0,78	1,49	0,50	1,64	

3.5.11.3. **Metodología y estimación del volumen de lahares**

Una vez calculados los volúmenes de agua disponible para ser fundida en caso de erupción, se procedió a evaluar la cantidad fundida para cada uno de los escenarios definidos en el punto 4. A estos volúmenes se añadieron volúmenes de sólidos en las proporciones estipuladas en el apartado 6. Es decir, para el caso en estudio se considera que los lahares tienen un comportamiento de flujos hiperconcentrados y por lo tanto se añadieron sólidos en proporciones máxima (66% en volumen) y mínima (20%).

3.5.11.3.1 Estimación de volumen de lahares escenarios 1 2 y 3

Como se explicó en el punto 3.5.8.1 Los escenarios 1. 2 y 3 corresponden a erupciones de tipo subpliniana a pliniana con emisiones importantes de flujos de piroclastos, oleadas y piroclastos de caída.

Para la estimación del volumen de nieve y hielo que podría generar flujos laháricos en este tipo de escenario se tomó como referencia los porcentajes de nieve y hielo afectados por este tipo de procesos en el Nevado del Ruiz, que fueron estudiados por Pierson (1985). Pierson (1990). Thouret (2007) y Huggel (2007).

En total según las estimaciones realizadas por Thouret et al. 1990 y 2007 el glaciar sobre el volcán Nevado del Ruiz perdió una área igual a 16% y un volumen igual al 9% del volumen total de nieve y hielo. Según Naranjo (comunicación personal) la erupción del Nevado del Ruiz tuvo una magnitud que se hallaría entre las erupciones de 1864 y ca.1550.

Tal y como se indicó en el apartado 4.1 las características de los escenarios 1. 2. 3 y los porcentajes estimados de fusión de hielo y nieve serían los siguientes:

- Escenario 1 (erupción tipo 1864): erupción vulcaniana con desarrollo importante de piroclastos (flujos. oleadas y caída) y avalanchas mixtas, algo menor a la del Nevado del Ruiz de 1985, y que fundiría una cantidad de hielo y nieve del orden del 12% en área y 7% en volumen del total existente en la actualidad.
- Escenario 2 (erupción tipo ca. 1550): erupción vulcaniana con desarrollo importante de piroclastos (flujos. oleadas y caída) y avalanchas mixtas. algo

mayor a la del Nevado del Ruiz de 1985, y que fundiría una cantidad de hielo y nieve del orden del 22% en área y 13% en volumen del total existente en la actualidad.

- Escenario 3 (erupción tipo Enco): erupción Vulcaniana-Pliniana con desarrollo importante de piroclastos (flujos, oleadas y caída) y avalanchas mixtas, algo menor a la del Nevado del Ruiz, y que fundiría una cantidad de hielo y nieve del orden del 30% en área y 17% en volumen del total existente en la actualidad.

Los volúmenes perdidos de hielo, nieve y agua equivalente estimados para la situación en el escenario mínimo y máximo para cada uno de los escenarios se presentan en las Tablas 3.5.11.3.1-A, B y C.

Tabla 3.5.11.3.1-A. Volúmenes de agua que serían fundidos en un escenario eruptivo tipo 1 (erupción vulcaniana tipo 1864) para cada cuenca.

Cuenca	Volumen de agua total en la cuenca. escenario mínimo (10⁶ *m³)	Volumen de agua total en la cuenca. escenario máximo (10⁶ *m³)	Porcentaje de fusión	Volumen de agua fundida. escenario mínimo (10⁶ *m³)	Volumen de agua fundida. escenario máximo (10⁶ *m³)
Río Blanco-Enco	74,87	99,32	7%	5,24	6,95
Estero Pirinel	145,05	160,97	7%	10,15	11,27
Estero Punahue	27,95	38,47	7%	1,96	2,69
Quebrada sin nombre N	11,57	17,72	7%	0,81	1,24
Río Triful	79,25	87,66	7%	5,55	6,14
Quebrada sin nombre NE	31,93	36,01	7%	2,23	2,52
Río Blanco-Pillanleufú	113,50	132,35	7%	7,94	9,26
Río Mocho	503,20	527,29	7%	35,22	36,91
Río Chico	270,43	290,29	7%	18,93	20,32
Total	1.257,74	1.390,09		88,04	97,31

Tabla 3.5.11.3.1-B. Volúmenes de agua que serían fundidos en un escenario eruptivo tipo 2 (erupción vulcaniana tipo ca. 1550) para cada cuenca.

Cuenca	Volumen de agua total en la cuenca. escenario mínimo (10⁶ *m³)	Volumen de agua total en la cuenca. escenario máximo (10⁶ *m³)	Porcentaje de fusión	Volumen de agua fundida. escenario mínimo (10⁶ *m³)	Volumen de agua fundida. escenario máximo (10⁶ *m³)
Río Blanco-Enco	74,87	99,32	13%	9,73	12,91
Estero Pirinel	145,05	160,97	13%	18,86	20,93
Estero Punahue	27,95	38,47	13%	3,63	5,00
Quebrada sin nombre N	11,57	17,72	13%	1,50	2,30
Río Triful	79,25	87,66	13%	10,30	11,40
Quebrada sin nombre NE	31,93	36,01	13%	4,15	4,68
Río Blanco-Pillanleufú	113,50	132,35	13%	14,75	17,21
Río Mocho	503,20	527,29	13%	65,42	68,55
Río Chico	270,43	290,29	13%	35,16	37,74
Total	1.257,74	1.390,09		163,51	180,71

Tabla 3.5.11.3.1-C. Volúmenes de agua que serían fundidos en un escenario eruptivo tipo 3 (erupción vulcaniana-pliniana tipo Enco) para cada cuenca.

Cuenca	Volumen de agua total en la cuenca. escenario mínimo (10⁶ *m³)	Volumen de agua total en la cuenca. escenario máximo (10⁶ *m³)	Porcentaje de fusión	Volumen de agua fundida. escenario mínimo (10⁶ *m³)	Volumen de agua fundida. escenario máximo (10⁶ *m³)
Río Blanco-Enco	74,87	99,32	17%	12,73	16,88
Estero Pirinel	145,05	160,97	17%	24,66	27,37
Estero Punahue	27,95	38,47	17%	4,75	6,54
Quebrada sin nombre N	11,57	17,72	17%	1,97	3,01
Río Triful	79,25	87,66	17%	13,47	14,90
Quebrada sin nombre NE	31,93	36,01	17%	5,43	6,12
Río Blanco-Pillanleufú	113,50	132,35	17%	19,29	22,50
Río Mocho	503,20	527,29	17%	85,54	89,64
Río Chico	270,43	290,29	17%	45,97	49,35
Total	1.257,74	1.390,09		213,82	236,31

La fusión de hielo y nieve en este escenario sería prácticamente instantánea, debido a la alta velocidad que alcanzan los flujos de piroclastos y a la corta distancia que hay entre la cima del cráter y el límite inferior de hielo/nieve (del orden de 2-3 km en la mayor parte de las cuencas).

Si a estos volúmenes de agua le sumamos los volúmenes de sólidos teóricos correspondientes a un flujo hiperconcentrado se obtienen los resultados mostrados en las Tablas 3.5.11.3.1-D, E y F.

Tabla 3.5.11.3.1-D. Volúmenes de lahares estimados para cada cauce en un escenario eruptivo tipo 1 (erupción vulcaniana tipo 1864) para cada cuenca.

Cuenca	Volumen de agua fundida. escenario mínimo ($10^6 * m^3$)	Volumen de agua fundida. escenario máximo ($10^6 * m^3$)	Vol. lahar con 20% de sólidos. escenario mínimo ($10^6 * m^3$)	Vol. lahar con 20% de sólidos. escenario máximo ($10^6 * m^3$)	Vol. lahar con 66% de sólidos. escenario mínimo ($10^6 * m^3$)	Vol. lahar con 66% de sólidos. escenario máximo ($10^6 * m^3$)
Estero Punahue	5,24	6,95	6,55	8,69	15,41	20,44
Quebrada sin nombre N	10,15	11,27	12,69	14,09	29,85	33,13
Río Triful	1,96	2,69	2,45	3,37	5,75	7,92
Quebrada sin nombre NE	0,81	1,24	1,01	1,55	2,38	3,65
Río Blanco-Pillanleufú	5,55	6,14	6,93	7,67	16,31	18,04
Río Mocho	2,23	2,52	2,79	3,15	6,57	7,41
Río Chico	7,94	9,26	9,93	11,58	23,36	27,24
Río Blanco	35,22	36,91	44,03	46,14	103,56	108,52
Estero Pirinel	18,93	20,32	23,66	25,40	55,65	59,74
Total	88,04	97,31	110,05	121,63	258,84	286,08

Tabla 3.5.11.3.1-E. Volúmenes de lahares estimados para cada cauce en un escenario eruptivo tipo 2 (erupción vulcaniana tipo ca. 1550) para cada cuenca.

Cuenca	Volumen de agua fundida. escenario mínimo (10 ⁶ *m ³)	Volumen de agua fundida. escenario máximo (10 ⁶ *m ³)	Vol. lahar con 20% de sólidos. escenario mínimo (10 ⁶ *m ³)	Vol. lahar con 20% de sólidos. escenario máximo (10 ⁶ *m ³)	Vol. lahar con 66% de sólidos. escenario mínimo (10 ⁶ *m ³)	Vol. lahar con 66% de sólidos. escenario máximo (10 ⁶ *m ³)
Estero Punahue	9,73	12,91	12,17	16,14	28,62	37,96
Quebrada sin nombre N	18,86	20,93	23,57	26,16	55,44	61,52
Río Triful	3,63	5,00	4,54	6,25	10,68	14,70
Quebrada sin nombre NE	1,50	2,30	1,88	2,88	4,42	6,77
Río Blanco-Pillanleufú	10,30	11,40	12,88	14,24	30,29	33,50
Río Mocho	4,15	4,68	5,19	5,85	12,20	13,76
Río Chico	14,75	17,21	18,44	21,51	43,38	50,58
Río Blanco	65,42	68,55	81,77	85,69	192,32	201,53
Estero Pirinel	35,16	37,74	43,94	47,17	103,36	110,95
Total	163,51	180,71	204,38	225,89	480,71	531,29

Tabla 3.5.11.3.1-F. Volúmenes de lahares estimados para cada cauce en un escenario eruptivo tipo 3 (erupción vulcaniana-pliniana tipo Enco) para cada cuenca.

Cuenca	Volumen de agua fundida. escenario mínimo (10 ⁶ *m ³)	Volumen de agua fundida. escenario máximo (10 ⁶ *m ³)	Vol. lahar con 20% de sólidos. escenario mínimo (10 ⁶ *m ³)	Vol. lahar con 20% de sólidos. escenario máximo (10 ⁶ *m ³)	Vol. lahar con 66% de sólidos. escenario mínimo (10 ⁶ *m ³)	Vol. lahar con 66% de sólidos. escenario máximo (10 ⁶ *m ³)
Estero Punahue	12,73	16,88	15,91	21,10	37,42	49,64
Quebrada sin nombre N	24,66	27,37	30,82	34,21	72,50	80,45
Río Triful	4,75	6,54	5,94	8,18	13,97	19,23
Quebrada sin nombre NE	1,97	3,01	2,46	3,77	5,78	8,86
Río Blanco-Pillanleufú	13,47	14,90	16,84	18,63	39,61	43,81
Río Mocho	5,43	6,12	6,78	7,65	15,96	18,00
Río Chico	19,29	22,50	24,12	28,12	56,73	66,15
Río Blanco	85,54	89,64	106,93	112,05	251,50	263,54
Estero Pirinel	45,97	49,35	57,47	61,69	135,16	145,09
Total	213,82	236,31	267,27	295,39	628,62	694,76

Se debe tener en cuenta que los volúmenes totales del flujo calculados en la tabla anterior corresponden a todo el volumen que produce la erupción y que generalmente baja en diferentes oleadas a lo largo de varias horas o incluso días.

3.5.11.3.2 Estimación de volumen de lahares escenario 4

El escenario tipo 4 corresponde a una erupción efusiva desde la cima del Mocho que emitiría una colada andesítica o andesítico-dacítica que correría sobre el hielo fundiendo una cantidad de hielo/nieve en un espacio de tiempo determinado. Este tipo de erupción tendría un comportamiento similar a la erupción del monte Veniaminof de 1983, mostrada en la imagen 3.5.8.2-A. se trataría de coladas de lava que surgirían del cono central del volcán Mocho, bajaría por sus laderas de manera más o menos rápida hasta al alcanzar la zona de pendiente menor correspondiente a la caldera. En este punto las coladas se desplazarían a menor velocidad, comenzarían a fundir hielo de manera más importante y comenzarían a hundirse en él hasta alcanzar su base.

En este escenario asumimos que la tasa de emisión de lavas es suficientemente importante para permitir a las coladas fundir todo el espesor de hielo y avanzar. Según Moreno en el volcán Villarrica la tasa de emisión de lavas capaz de producir lahares se estima superior a $100 \text{ m}^3/\text{s}$. Durante este avance las coladas podrían dividirse en diferentes brazos. Para simular este proceso se ha utilizado el software MSF para definir las trayectorias de coladas más probables sobre el hielo. A esas trayectorias más probables se le han añadido posibles rutas alternativas que permiten simular la división en diferentes ramas de las coladas. En la Fig. 3.5.11.3.2-A se muestran las rutas de las coladas simuladas.

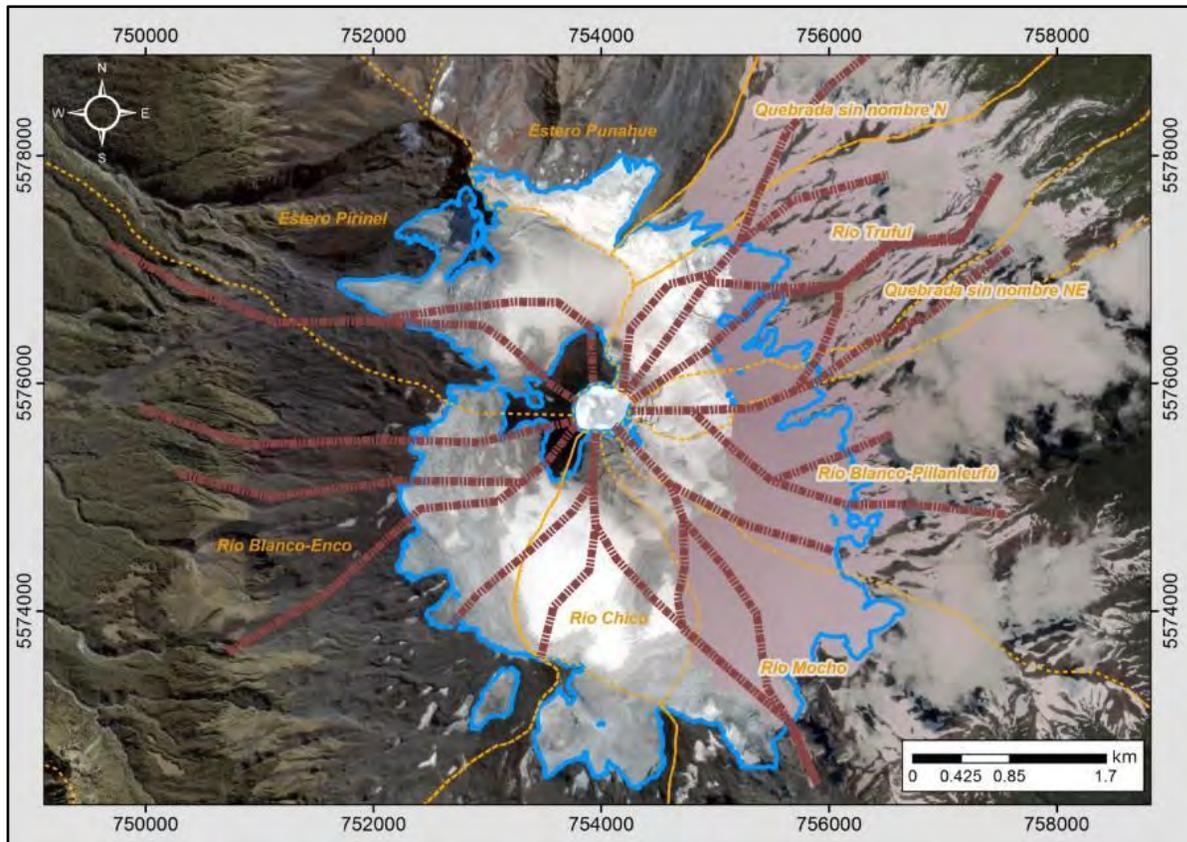


Fig. 3.5.11.3.2-A. Rutas de coladas simuladas.

Una vez establecidas las posibles rutas de las coladas se les ha dado un ancho de colada promedio de 400 m. Con lo cual se ha generado una envolvente que une todos los brazos de cada colada, generando de esta manera un polígono que representa la depresión resultante de la fusión del glaciar. Toda esa área es la que se ha tenido en cuenta a la hora de estimar la cantidad de agua en forma de hielo o nieve que puede ser fundida. En la Fig. 3.5.11.3.2-B se muestra las coladas estimadas y su envolvente. No ha de pensarse que todas las coladas se dan al mismo tiempo y por lo tanto se funde la mayor parte del glaciar, lo que se está modelando son las coladas que surgirían hacia cada cuenca concreta, dándose en una supuesta erupción solo las coladas que vierten hacia la cuenca simulada, quedando el resto del glaciar sin afectación significativa. En la Tabla 3.5.11.3.2-A se muestra volumen total de agua fundida en cada cuenca en un escenario mínimo y máximo. Tal y como se ha explicado con anterioridad (ver capítulo 3.5.11.2.2) para el escenario mínimo se ha considerado los datos de espesor de hielo/nieve obtenidos en las campañas de radar realizadas en octubre, considerando nieve solo sobre el glaciar.

Para el escenario máximo se optó por penalizar esos mismos datos de octubre añadiéndoles un 50% del equivalente de agua del invierno de 2009 (ver apartado 3.5.11.1) para la zona englaciada y contabilizar el 100% para la zona fuera del glaciar (hasta la cota 1000).

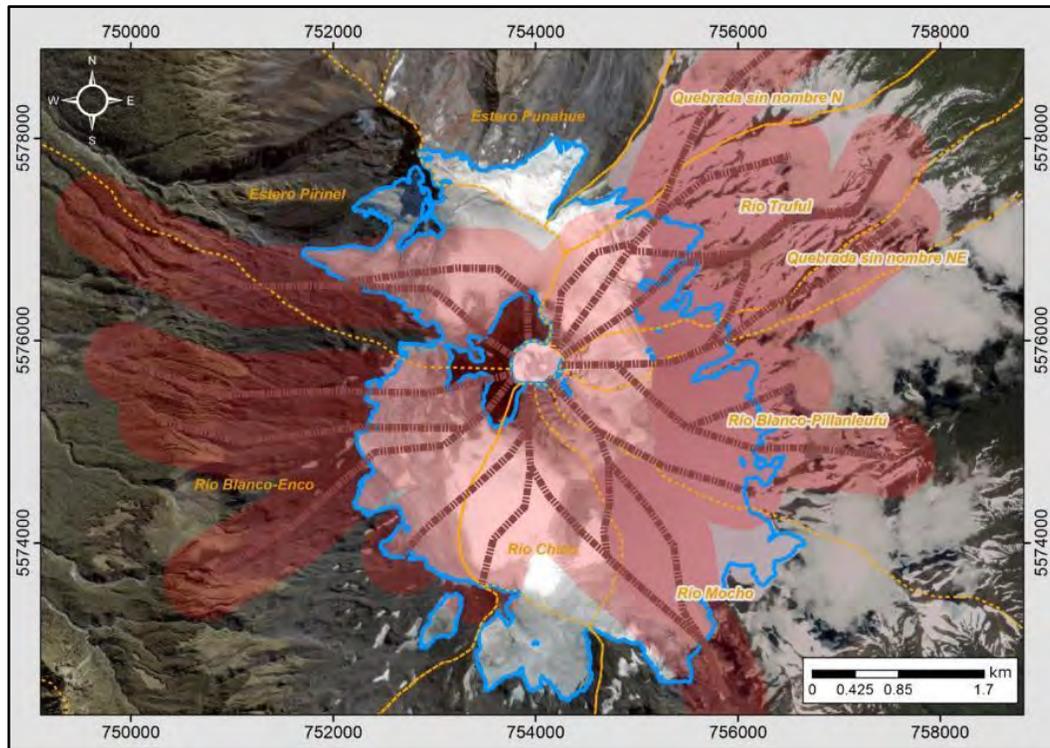


Fig. 3.5.11.3.2-B. Coladas simuladas y estimación área fundida.

Tabla 3.5.11.3.2-A. Estimación volúmenes de agua que serían fundidos en un escenario eruptivo tipo 4 (erupción efusiva) para cada cuenca.

Cuenca	Volumen de agua total en la cuenca. escenario mínimo	Volumen de agua total en la cuenca. escenario máximo
	($10^6 * m^3$)	($10^6 * m^3$)
Río Blanco-Enco	71,16	87,06
Estero Pirinel	75,25	128,21
Estero Punahue*		

Cuenca	Volumen de agua total en la cuenca. escenario mínimo (10⁶ *m³)	Volumen de agua total en la cuenca. escenario máximo (10⁶ *m³)
Quebrada sin nombre N	8,28	12,10
Río Triful	79,25	86,67
Quebrada sin nombre NE	31,93	34,38
Río Blanco-Pillanleufú	113,50	121,12
Río Mocho	461,54	513,51
Río Chico	137,36	274,27
Total	978,26	1.257,32

*El estero Punahue no estaría afectado por coladas de lava provenientes del cono del Mocho

De igual manera que en los escenarios anteriores, si a estos volúmenes de agua le sumamos los volúmenes de sólidos teóricos correspondientes a un flujo hiperconcentrado se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 3.5.11.3.2-B.

Tabla 3.5.11.3.2-B. Volúmenes de lahares estimados para cada cauce en un escenario eruptivo tipo 4 (erupción efusiva) para cada cuenca.

Cuenca	Volumen de agua fundida escenario mínimo (10⁶ *m³)	Volumen de agua fundida escenario máximo (10⁶ *m³)	Vol. lahar con 20% de sólidos y escenario mínimo (10⁶ *m³)	Vol. lahar con 20% de sólidos y escenario máximo (10⁶ *m³)	Vol. lahar con 66% de sólidos y escenario mínimo (10⁶ *m³)	Vol. lahar con 66% de sólidos y escenario máximo (10⁶ *m³)
Río Blanco-Enco	71,16	87,06	88,95	108,83	209,22	255,96
Estero Pirinel	75,25	128,21	94,06	160,27	221,23	376,95
Estero Punahue*						
Quebrada sin nombre N	8,28	12,10	10,35	15,12	24,35	35,56
Río Triful	79,25	86,67	99,06	108,33	232,99	254,80
Quebrada sin nombre NE	31,93	34,38	39,91	42,98	93,87	101,09
Río Blanco-Pillanleufú	113,50	121,12	141,87	151,41	333,68	356,10
Río Mocho	461,54	513,51	576,92	641,88	1356,91	1509,71

Cuenca	Volumen de agua fundida escenario	Volumen de agua fundida escenario	Vol. lahar con 20% de sólidos y	Vol. lahar con 20% de sólidos y	Vol. lahar con 66% de sólidos y	Vol. lahar con 66% de sólidos y
Río Chico	137,36	274,27	171,70	342,84	403,84	806,36
Total	978,26	1257,32	1222,82	1571,65	2876,08	3696,53

*El estero Punahue no estaría afectado por coladas de lava provenientes del cono del Mocho

Se debe tener en cuenta que los volúmenes totales del flujo calculados en la tabla anterior corresponden a todo el volumen que produce la erupción y que generalmente baja en diferentes oleadas a lo largo de varias horas o incluso días.

3.5.12. Modelación de Lahares

Se han utilizado dos programas informáticos que permitan modelar los lahares: LaharZ y MSF. Aunque la base de modelación de cada uno es diferente (ver capítulo 3.5.4.3), ambos necesitan un dato de entrada común, el DEM. El modelo MSF a parte del DEM solo requiere otro dato de entrada, la ratio V/L que corresponde a la distancia vertical que el flujo desciende y L es la distancia horizontal recorrida. La relación V/L debe ser definida **por el usuario y debe corresponder al "peor escenario"**, esto es, la máxima extensión que podría tener un flujo en la zona estudiada, de acuerdo a los datos de que se dispongan.

En cuanto al programa LaharZ los datos de entrada (a parte del DEM) son los volúmenes de lahar estimados (ver capítulo 3.5.11) y el área de riesgo cercano, que para el caso de lahares se utiliza los puntos conocidos donde los sedimentos laháricos de erupciones anteriores comienzan.

3.5.12.1. Elección del DEM

El uso de modelos numéricos computacionales para la simulación de zonas de inundación debido a flujos laháricos, requiere la utilización de modelos digitales de terreno (DEMs) sobre los cuales éstos sean aplicados. Los DEMs se pueden obtener de diversas fuentes y a través de diferentes métodos. Cada uno de estos modelos tiene sus fuentes de error, por lo que se requiere un estudio de sensibilidad en los diferentes modelos a utilizar con cada uno de ellos. Asimismo, es necesario efectuar un análisis de las ventajas y

desventajas de los diferentes DEMs, para determinar el que mejor se ajusta a los propósitos deseados (Castruccio 2008).

Para la realización de este estudio se valoró la posibilidad de utilizar el DEM SRTM y uno generado con el programa ArcGIS 10 a partir de las curvas IGM a escala 1/50000 con equidistancia de 50 m. Finalmente solo se optó por utilizar el DEM IGM ya que no se considera adecuada la resolución de 90 m que presenta el DEM SRTM, además de los errores asociados a este tipo de DEM: sobreestimación de la altura del terreno debido a vegetación y errores de cálculo de la altura en zonas con alta pendiente.

Para el DEM IGM se optó por una resolución de 25 m. más adecuada que la SRTM. Aunque una resolución menor hubiese sido mejor, se decidió no reducirla más porque la interpolación no hubiese devuelto resultados fiables. El DEM generado a partir de estas curvas ofrece un buen resultado general pero tiene problemas donde las curvas de nivel se espacian (zonas llanas) por lo cual se ha tenido que intercalar curvas de menor equidistancia en dichas zonas llanas (sectores Enco. Choshuenco y Arquihue), delimitar los lagos con su cota ya que no se encontraban delimitados con las curvas IGM y añadir puntos de cota del IGM o manualmente para corregir y mejorar la interpolación.

Tal como indica Castruccio (2008), durante el proceso de interpolación, se producen 2 tipos de error. El primero se relaciona con zonas donde las curvas de nivel son sinuosas y no están lo suficientemente cerca, por lo que el programa que interpola las curvas no **considera esta sinuosidad y se generan zonas planas o "flat - spots"**, que podrían afectar los caminos que puedan seguir los flujos (Stevens et al.. 2002). En la Fig. 3.5.12.1-A se muestra este tipo de error.

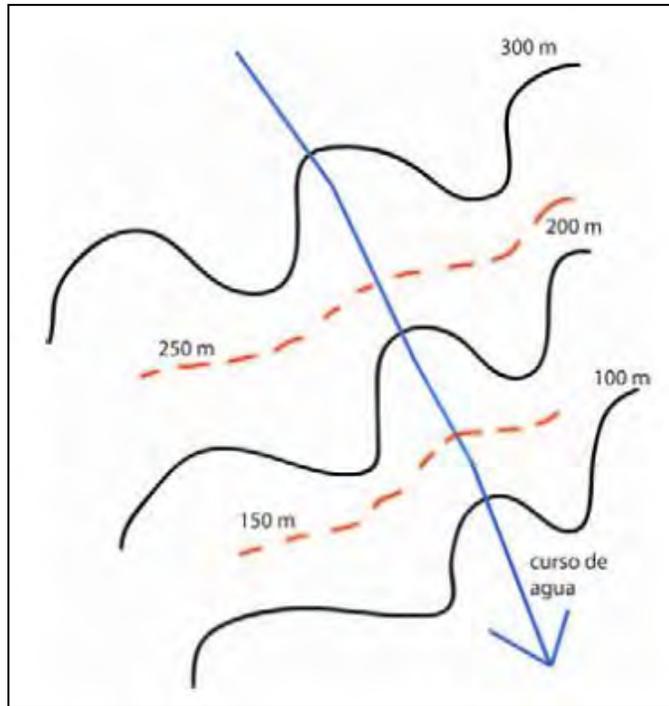


Fig. 3.5.12.1-A. Error que se genera al interpolar en zonas con curvas de nivel sinuosas y separas entre sí (fuente Castruccio. 2008).

El segundo tipo de error corresponde a la generación de "sinks" en zonas muy planas, donde las curvas de nivel se encuentran muy alejadas. El error de interpolación generado consiste en que el software genera zonas deprimidas no existentes en la realidad (Fig. 3.5.12.1-B). Para corregir ambos errores se agregó manualmente curvas de nivel intermedias y puntos de cota que permitieran caracterizar mejor el terreno, utilizando para ello fotografías aéreas y satelitales.

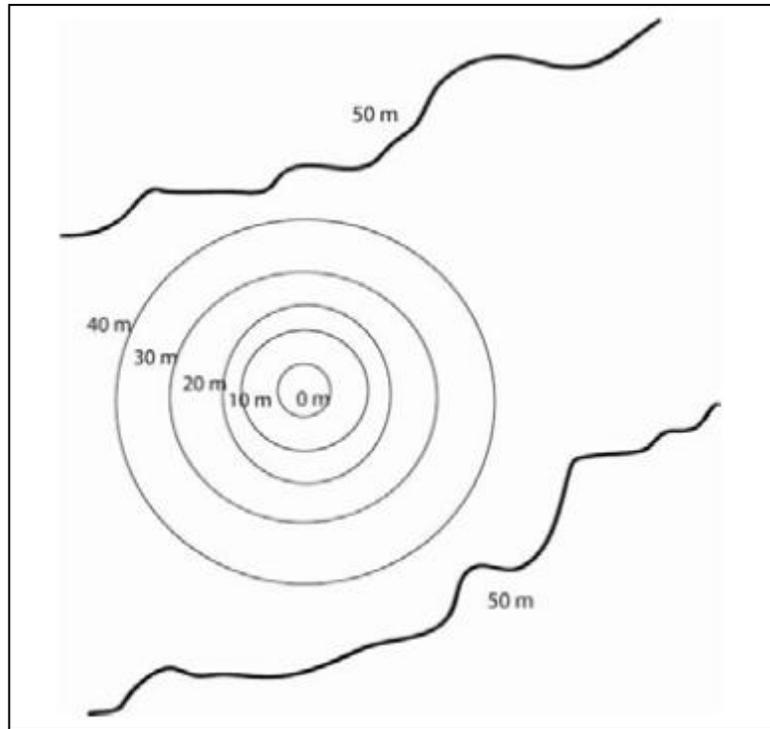


Fig. 3.5.12.1-B. Error que se genera en zonas llanas con curvas de nivel demasiado espaciadas (fuente Castruccio. 2008).

Para poder contrastar la bondad del DEM se optó por interpolarlo mediante dos métodos diferentes, ambos a partir del DEM mejorado y de esta manera poder interpretar mejor los posibles errores de interpolación y separarlos de aquellos puntos que puedan mostrar posibles áreas de inundación no esperadas.

El primer método de interpolación consistió en la utilización de la herramienta "TopotoRaster" que genera un DEM directamente de los datos de entrada (curvas de nivel y puntos de cota). Esta herramienta es muy sensible a la calidad del mapa topográfico (equidistancia entre curvas) y por ello presenta mayor frecuencia los errores indicados con anterioridad (sinks y flat-spots), por ello ha necesitado de mejoras importantes en los datos de entrada. No obstante esta herramienta se ajusta mejor a la realidad y los pequeños cambios de pendiente, variable de suma importancia en los cálculos que realizan las dos aplicaciones utilizadas en la modelación.

El segundo método consiste en la generación de un TIN a partir de las curvas de nivel mejoradas y a partir de este se genera el DEM. Este sistema representa mejor los cauces y divisorias por lo cual canaliza mucho mejor los flujos, pero por otro lado si los datos de entrada (curvas de nivel) no son de una resolución adecuada puede presentar errores graves en la definición de las pendientes de los triángulos.

En la Fig. 3.5.12.1-C se muestra la diferencia de cota entre el DEM interpolado con la herramienta "TopoToRaster" y el interpolado mediante TIN en el sector sudeste del volcán.

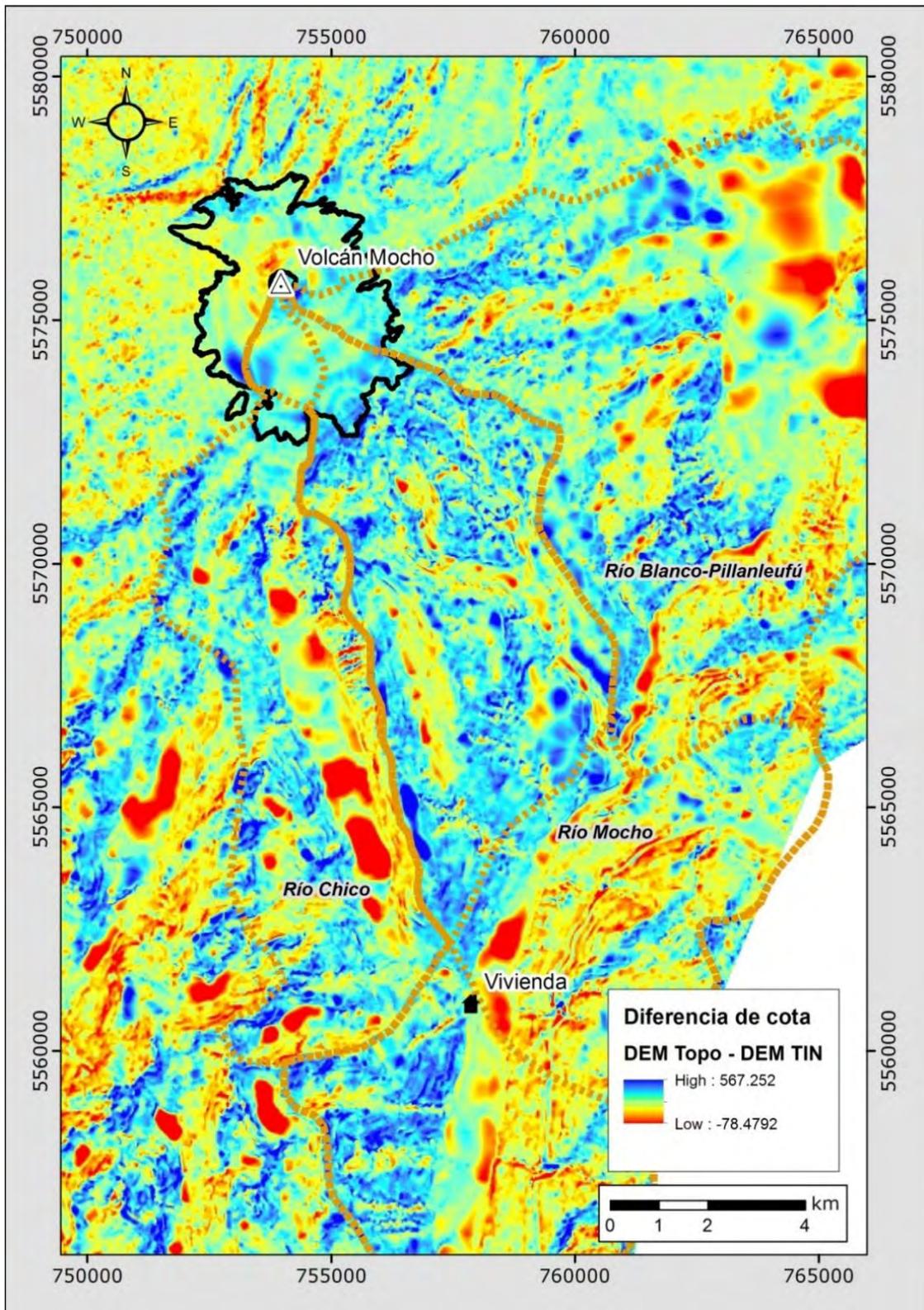


Fig. 3.5.12.1-C. Diferencia de cota entre el DEM "TopoToRaster" y el generado a partir de TIN (sector sudeste).

Tal y como se puede observar en la figura, el DEM basado en el TIN da valores más bajos en las zonas de divisorias reflejando la falta de puntos de cota en esas zonas, interpolando únicamente a partir de las curvas de nivel. Por su parte en las zonas de valles da un valor más alto que el DEM basado en la herramienta "TopoToRaster".

3.5.12.2. **Modelación con LAHARZ**

3.5.12.2.1 Introducción

LAHARZ es un programa computacional, desarrollado por el Servicio Geológico de Estados Unidos en 1998 (Iverson et al., 1998; Schilling, 1998) que permite delinear zonas de peligro volcánico, asociadas a la posible inundación generada por flujos laháricos a través de un método semiempírico. Este modelo está implementado en el ambiente ArcGIS y ha sido ampliamente utilizado en diversos volcanes alrededor del mundo (Schilling et al., 2001; Canuti et al., 2002; Stevens et al., 2002; Hubbard et al., 2007, por citar algunos ejemplos) (Castruccio 2008).

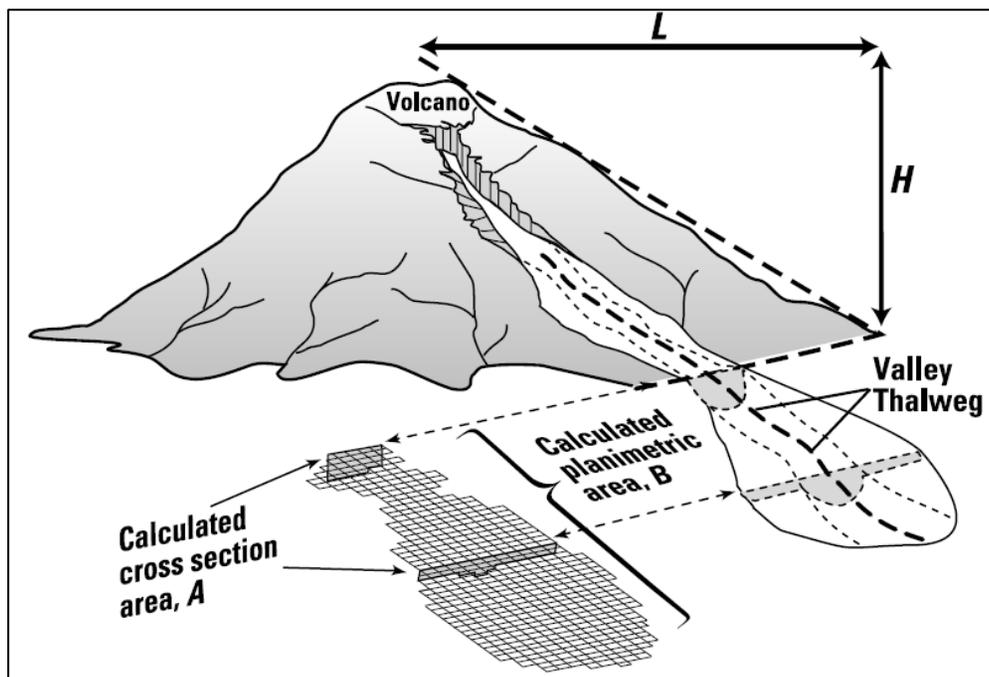


Fig. 3.5.12.2.1-A. Sección transversal (A) y planimétrica (B) definidas para un lahar, que se utilizan en el programa LAHARZ. La razón H/L describe el alcance de la zona de peligro proximal, a partir del cual comienza la deposición en la simulación (de Schilling, 1998).

El método utiliza una combinación de análisis dimensional y estadístico para determinar las áreas de inundación transversal (A) y planimétricas (B) generadas por el flujo lahárico, en función del volumen de éste (Fig. 3.5.12.2.1-A). A través de una serie de ecuaciones en que se asume una masa y densidad constante y, por lo tanto, un volumen constante, se llega a las siguientes relaciones (los detalles de la derivación de las ecuaciones se encuentran en Iverson et al., 1998)(Castruccio 2008):

$$A = C V^{2/3}$$

$$B = c V^{2/3}$$

En que V es el volumen del lahar. C y c son constantes adimensionales. Para calcular las constantes adimensionales C y c, se utilizaron los datos de volumen e inundación de 27 lahares en 9 volcanes, determinados a partir de depósitos y observaciones de lahares recientes, más algunos datos de experimentos en flujos de volumen más pequeño. Las ecuaciones quedan entonces de la siguiente manera:

$$A = 0.05 V^{2/3}$$

$$B = 200 V^{2/3}$$

Con estas 2 ecuaciones se puede predecir las áreas de inundación producidas por lahares de diferentes volúmenes.

El punto en el cauce a partir del cual el flujo lahárico comienza a inundar es definido por la intersección del cauce con el límite de la zona de peligro cercano, definido por el usuario, de acuerdo a la geología e historia eruptiva del volcán.

Según Castruccio (2008) el parámetro C de la ecuación A no se ajusta a lo ocurrido en el volcán Villarrica en erupciones históricas, por ello optó por modificarlo de manera que se ajustara mejor a la extensión de los lahares históricos, adoptando un valor de 0,015. Dada la inexistencia de datos en el volcán Mocho-Choshuenco se ha optado adoptar el valor de Castruccio para la modelación mediante Laharz realizada en este estudio.

De esta manera el procedimiento utilizado es el siguiente:

1. Elección del DEM. Para el caso estudiado y según las indicaciones de Castruccio (2008) se ha escogido un DEM generado a partir de las curvas de nivel IGM de la zona.
2. Mejora de la curvas de nivel en aquellas zonas donde ha sido necesario. Especialmente en zonas llanas (Castruccio. 2008) y en zonas con rupturas de pendiente marcadas y conocidas que el software de interpolación no ha reproducido adecuadamente. Para ello se añadieron manualmente puntos de cota y curvas de nivel y además se delimitaron los lagos.
3. Interpolación del DEM a partir de las curvas de nivel mejoradas. Se escogieron dos métodos de interpolación del abanico de posibilidades que ofrece el software ArcGIS. El primero consistió en la utilización de la herramienta **“TopotoRaster” que genera un DEM directamente de los datos de entrada** (curvas de nivel y puntos de cota). El segundo método utiliza un TIN intermedio a partir del cual se interpola el DEM Raster.

Se optó por generar dos DEMs para que se complementaran mutuamente ya que ningún método de interpolación garantiza que el resultado refleje exactamente la realidad.

4. Una vez generados los dos DEMs se eligió el generado con la herramienta **“TopotoRaster” ya que se consideró más representativo de la realidad**. Sobre este DEM se procedió a hacer correr el programa. para cada una de las cuencas. De los resultados se pudo concluir que zonas ofrecen mayor posibilidad de ser afectadas por lahares y se descartaron aquellas zonas que se consideraron errores atribuibles al DEM.

3.5.12.2.2 Resultados

Para un mejor análisis y una buena comprensión de los fenómenos modelados se ha agrupado los resultados por escenarios y se han analizado por zonas. Cabe tener en cuenta que cada escenario tiene sus particularidades y que los lahares modelados pueden darse en una o varias cuencas a la vez, en función hacia donde se produzcan los procesos volcánicos (flujos de piroclastos. coladas de lava...).

A la hora de interpretar los resultados se han de tener en cuenta que LaharZ tiene sus limitaciones y aunque da una idea de que zonas pueden ser inundadas, existentes procesos que no puede simular. Una de las principales de estas limitaciones corresponde a puntos donde las secciones transversales son más anchas y que podrían corresponder a puntos donde el flujo (o parte de él) desborda el cauce principal y se encauza por otros cursos. Son puntos críticos que indican posibles nuevas zonas de inundación que el programa no puede simular ya que se limita a un cauce. Otra limitación importante se da cuando diversas zonas de inicio diferentes confluyen en un cauce produciendo un aumento del volumen del lahar (caso del sector sudeste del volcán Mocho-Choshuenco donde los ríos Chicho y Mocho vierten sus aguas al Blanco-Pillanleufú). Otra limitación corresponde a la indicada por Castruccio (2008) y tiene que ver con que los lahares suelen ocurrir en varios pulsos de volúmenes menores al total fundido (el caso modelado). Los sedimentos dejados por los primeros pulsos cambiarían la topografía, lo que afectaría a los pulsos siguientes que tendrían que erosionar esos sedimentos o buscar otros caminos y como resultado de ello se verían afectadas nuevas zonas por la inundación.

Por último hay que remarcar que cualquier modelo no puede predecir con total exactitud los procesos que ocurren en la realidad, sino que indica un orden de magnitud y que existe cierto riesgo de que ocurra lo indicado por el modelo.

Escenario 1 (erupción vulcaniana tipo 1864)

En las Figs. 3.5.12.2.2-A, B, C y D se muestran los resultados obtenidos para un escenario tipo 1 en los sectores de Enco (Fig. 3.5.12.2.2-A), Norte (3.5.12.2.2-B) y cuencas que drenan hacia el río Blanco-Pillanleufú (3.5.12.2.2-C y D).

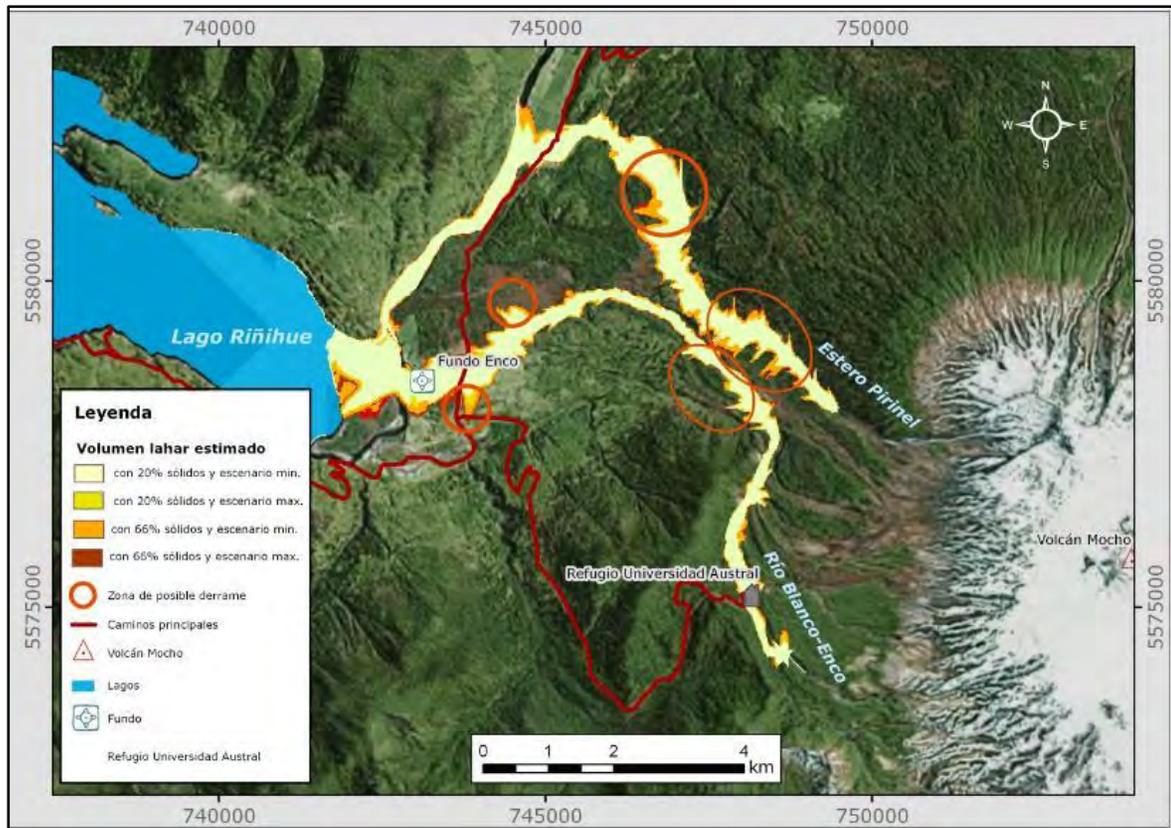


Fig. 3.5.12.2.2-A. Zonas de inundación modeladas en el sector de Enco para un escenario tipo 1 (erupción vulcaniana tipo 1864).

Tal como se muestra en la Fig. 3.5.12.2.2-A en caso que los lahares ocurrieran por el cauce del río Blanco-Enco el refugio de la Universidad Austral y las instalaciones de CONAF se verían afectadas por la inundación. Aunque según la modelación el lahar se mantiene bastante encauzado se observan diversos puntos (marcados con un círculo los más significativos) en que este podría desbordarse y desviar parte del flujo hacia otros cauces, con lo cual el área inundada se vería ampliada de manera importante. Como resultado de todo esto todo el área agropecuaria se Enco se vería afectada, así como el camino de acceso a la Reserva Nacional Mocho-Choshuenco.

Es de remarcar que todos los volúmenes simulados llegan al lago Riñihue por lo que habría que ver como esto afecta al volumen del lago y a la ocurrencia de oleajes algo fuertes.

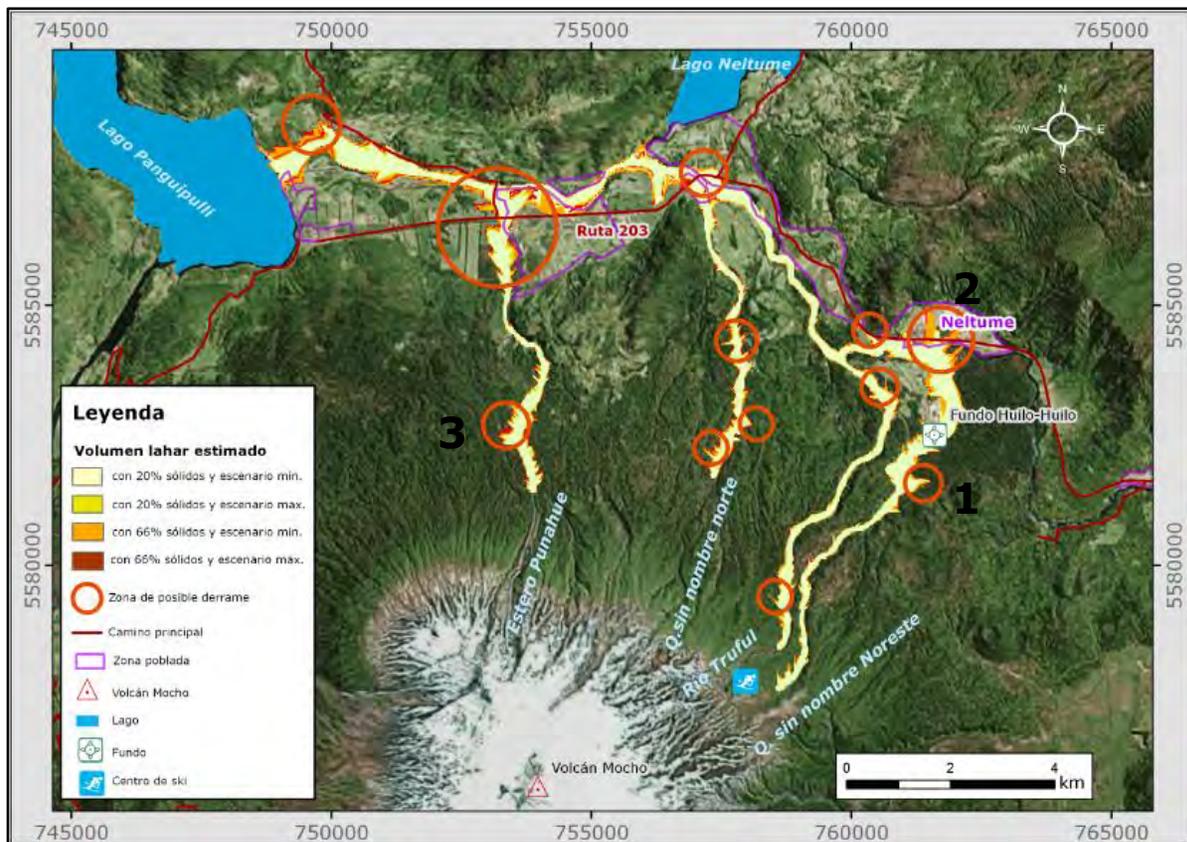


Fig. 3.5.12.2.2-B. Zonas de inundación modeladas en el sector Norte del volcán para un escenario tipo 1 (erupción vulcaniana tipo 1864).

En la Fig. 3.5.12.2.2-B se recogen las zonas inundadas simuladas en un escenario tipo 1 para el caso de que los lahares ocurrieran hacia el norte del volcán. Comenzando el análisis desde el Este hacia el Oeste, el primer punto de interés corresponde al centro de Ski de Huilo-Huilo. Si bien el inicio de la inundación se ha iniciado aguas abajo del núcleo principal de las instalaciones (punto designado a partir de los sedimentos encontrados en la zona), **no cabe duda que los flujos acuosos previos al lahar "sensu estricto" podrían afectarlas.** Si seguimos aguas abajo por los cauces del río Truful y la quebrada Sin Nombre Noreste no se observan posibles puntos de "fuga" del flujo hasta el indicado como 1, donde parte del flujo podría saltar a una quebrada menor e ir a parar al río Fui, lo cual podría tener repercusión sobre Neltume. Este punto también se ve reflejado en la modelación con MSF (ver capítulo 3.5.12.2.3).

Ya en la zona de entrada de Huilo-Huilo se puede observar que la quebrada Sin Nombre Noreste inunda de manera importante la pampa del sector de la entrada. Al llegar al río Fui se detectan varios derrames (marcados como desborde 2) que pueden afectar de manera importante a Neltume. En este sector también se detecta un posible desvío hacia el estero Llallarca que también indica el modelo con MSF (DEM topográfico) (ver capítulo 3.5.12.2.3). Este hecho se considera poco probable y si atribuye más a un error del DEM, no obstante se recomienda estudiar este punto en detalle.

El Triful en este sector discurre bastante encajonado por lo cual no se prevén desbordes importantes. Después de la unión entre el río Triful y el Fui, este recibe por su margen izquierda la quebrada Sin Nombre Norte. Esta quebrada, en la parte alta, muestra algunos posibles desbordes hacia quebradas menores que desaguarían en el Fui. La confluencia de la quebrada con el río Fui es un punto crítico ya que afectaría a las viviendas de la zona y a la ruta internacional 203, que en este punto cruza ambos cauces. Inmediatamente después de este punto se observa un desborde por la margen izquierda que afectaría a los campos del sector.

En la zona de confluencia con el río Neltume se observa cierta inundación de este lo cual podría estar indicando que el lahar podría remontar el río Neltume algunos cientos de metros, tal y como indica Pierson (1990) para el río Lagunillas durante la erupción del Nevado del Ruíz de 1985.

Una vez en el cauce del río Llanquihue, los volúmenes mayores desbordan por el margen izquierdo repetidas veces, afectando a las viviendas y explotaciones agropecuarias existentes en la zona, así como a la carretera y a algunos sectores del aeródromo de Choshuenco. Algunos de los volúmenes menores de las quebradas Sin Nombre Norte y Noreste no alcanzan el lago Panguipulli, pero en general la mayoría sí que lo alcanzan, por lo cual podrían afectar al nivel del lago o provocar oleajes algo fuertes.

En este tramo, el río Llanquihue recibe las aguas del estero Punahue que muestra pequeños desbordes en la zona del abanico aluvial formado por el mismo estero a su arribada al llano. En la parte media-alta de este estero se observan algunos posibles desvíos del flujo (indicado con 3) que serían los precursores de los desvíos hacia la zona de Enco que marcan los modelos realizados con MSF.

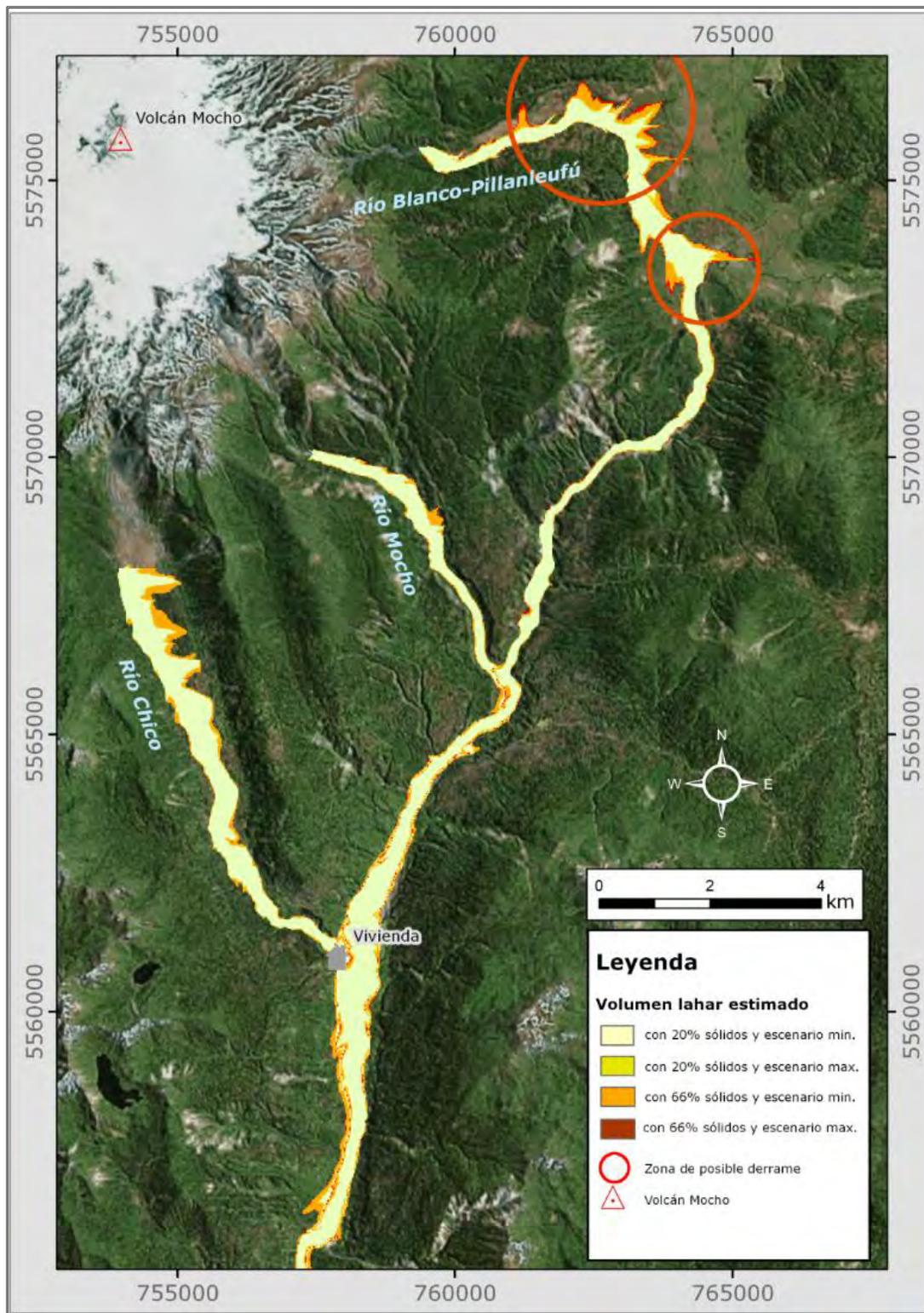


Fig. 3.5.12.2.2-C. Zonas de inundación modeladas en el sector Este-Sudeste (curso medio-alto) del volcán para un escenario tipo 1 (erupción vulcaniana tipo 1864).

Los cauces que drenan el complejo volcánico hacia el Este-Sudeste confluyen en el valle del río Blanco-Pillanleufú, se trata de los ríos Chico, Mocho y el propio Blanco-Pillanleufú. Son los que drenan una superficie mayor del glaciar y donde este tiene mayores espesores, por lo tanto son los que encauzan volúmenes de lahares mayores.

En la parte alta la modelación realizada en el río Blanco-Pillanleufú presenta importantes desbordes hacia el río Piedras Negras, el cual discurre paralelamente. Por lo que es de prever que el lahar fluirá por ambos cauces hasta su confluencia justo al sur de la pampa de Pilmaiquén. Resultado de ello se prevé que la zona inundada en la pampa será mayor que la indicada en el modelo, los puntos de desborde que se observan en la propia pampa (marcados con círculos) así lo parecen atestiguar.

A partir de la pampa el valle del río Blanco-Pillanleufú se estrecha y se ve inundado prácticamente en su totalidad por el lahar. En el valle del río Mocho se observa un comportamiento parecido. En el punto donde confluyen, el modelo parece indicar que el lahar del río Mocho remontaría el valle del río Blanco-Pillanleufú varios cientos de metros tal como se ha indicado con anterioridad para otros cauces. Un factor importante a tener en cuenta en esta confluencia es el aumento de volumen que se produciría, fenómeno no simulado por el modelo, si bien es de esperar que los caudales máximos descendientes por ambos cauces alcancen este punto en diferente momento.

El mismo hecho se espera que ocurra en la confluencia del río Chico. Es ese punto existe una vivienda que se encontraría en riesgo. Aguas abajo de este punto los diferentes lahares ocuparían toda la amplitud del valle.

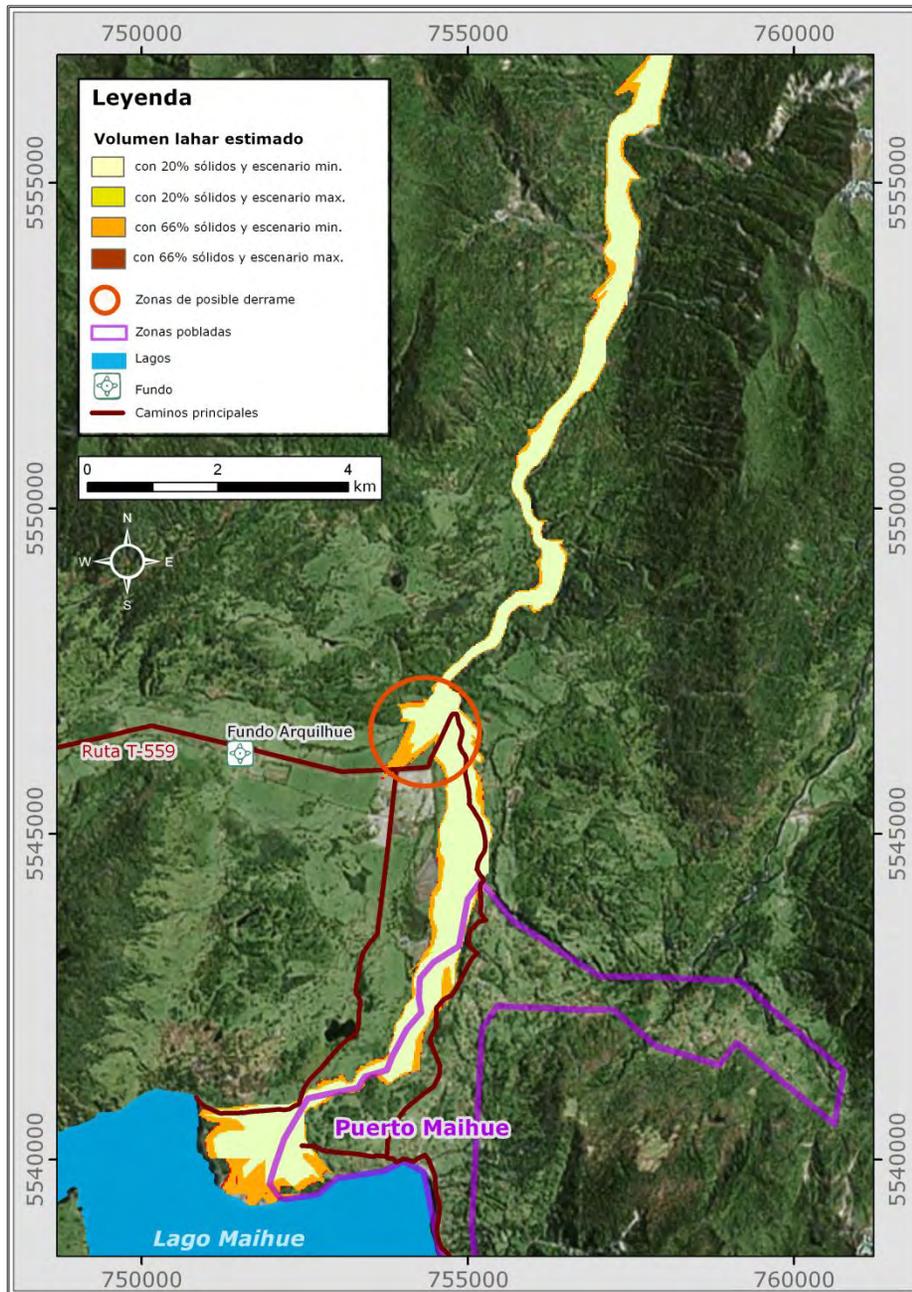


Fig. 3.5.12.2.2-D. Zonas de inundación modeladas en el sector Este-Sudeste (curso bajo) del volcán para un escenario tipo 1 (erupción vulcaniana tipo 1864).

No se observan desbordes importantes hasta las proximidades de la ruta T-559, allí donde esta cruza el río. Aguas abajo del puente podrían estar en peligro las casas de Puerto Maihue más cercanas al río, en la zona de confluencia con el río Curringue. En el

delta del río Blanco-Pillanleufú sobre el lago Maihue también se observan derrames importantes que afectarían a las casas situadas en él. Al igual que el resto de lagos, los lahares que llegan al Maihue afectarían a su volumen y podrían provocar oleajes algo fuertes.

Escenario 2 (erupción vulcaniana tipo ca. 1550)

En el escenario 2 los volúmenes por cuenca prácticamente se duplican y esto se refleja en que las zonas de inundación son más amplias. En general se repiten los mismos puntos críticos aunque más agudizados. En las Figs. 3.5.12.2.2-E, F, G y H se muestran los resultados obtenidos para un escenario tipo 2 en los sectores de Enco (Fig. 3.5.12.2.2-E), Norte (3.5.12.2.2-F) y cuencas que drenan hacia el río Blanco-Pillanleufú (3.5.12.2.2-G y H).

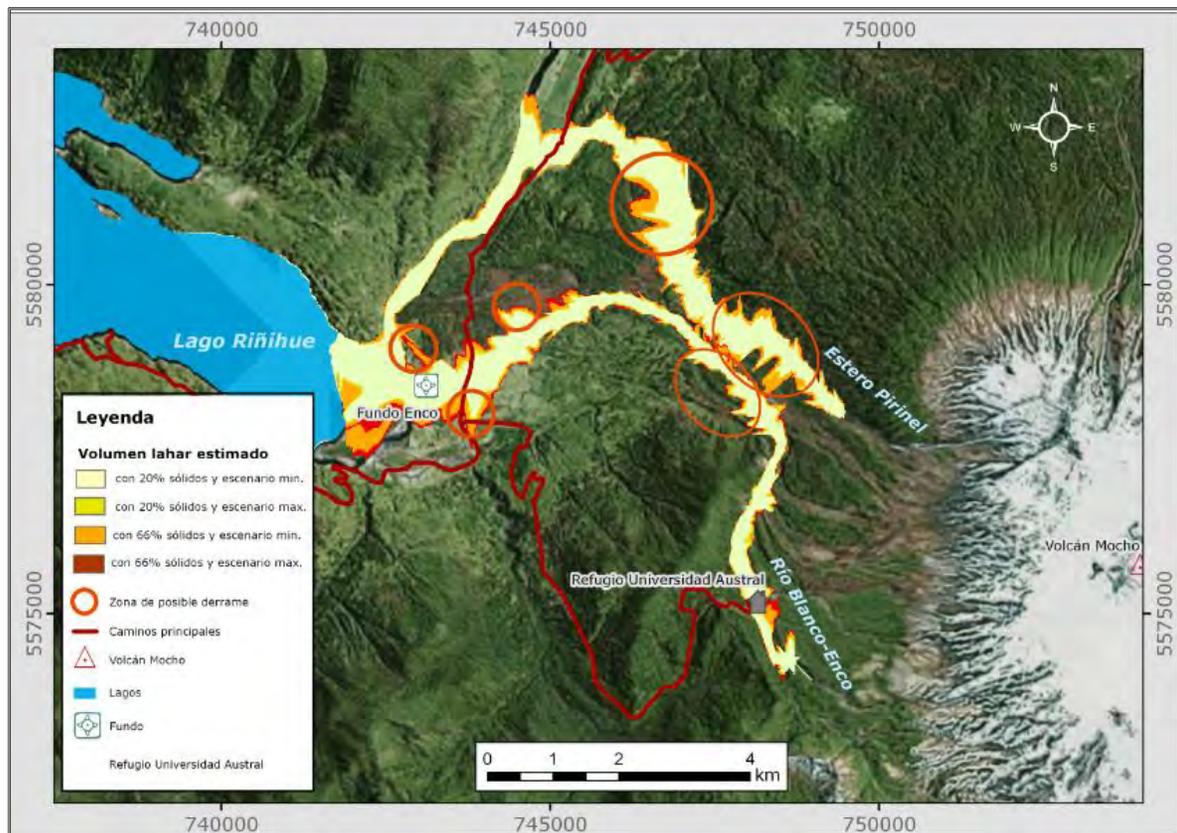


Fig. 3.5.12.2.2-E. Zonas de inundación modeladas en el sector de Enco para un escenario tipo 2 (erupción vulcaniana tipo ca. 1550).

En el sector de Enco se observan los mismos puntos de desborde, si bien más acentuados. Todas las observaciones realizadas para el escenario 1 siguen siendo válidas en el escenario 2. Datos remarcables en escenario 2 que no se incluían en el análisis del escenario 1 es que en el interfluvial entre el estero Pirinel y el río Blanco en el tramo central (donde discurren paralelos) los puntos de desborde se acentúan por lo cual se considera que los flujos laháricos pueden cambiar de cauce indistintamente y probablemente varias veces y por ello aumenta la probabilidad de que otros cauces menores del abanico de Enco sean utilizados, ampliándose de esta manera la zona inundada, tal como indican los modelos realizados con MSF.

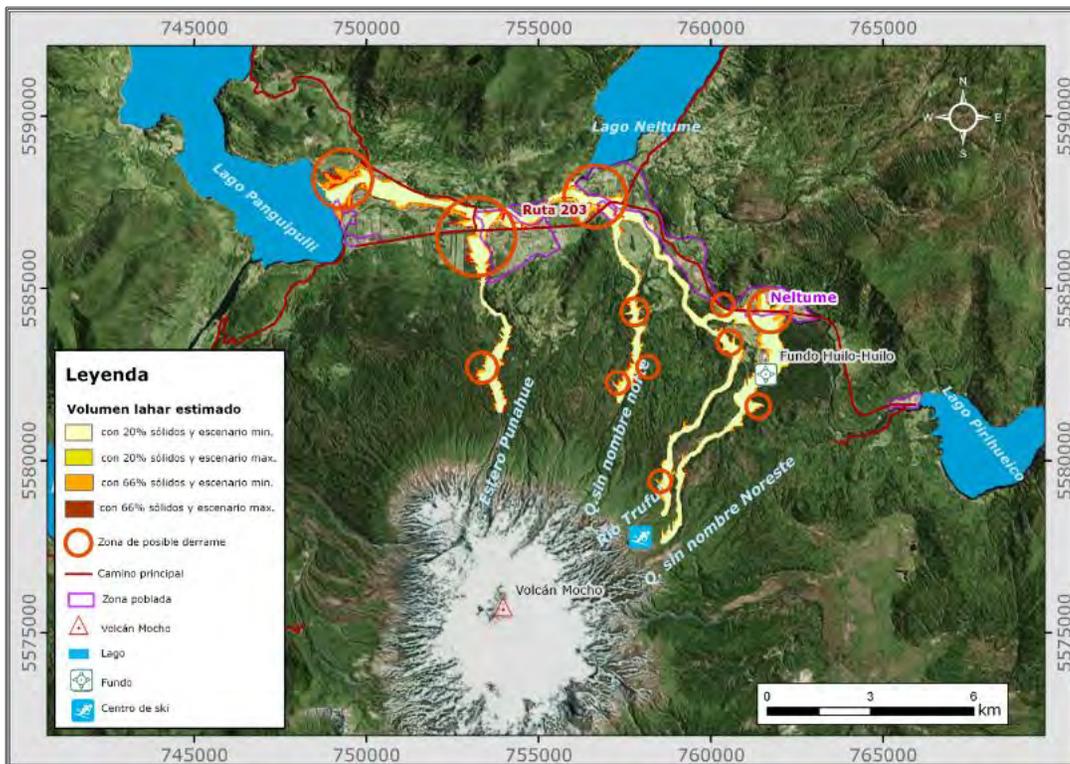


Fig. 3.5.12.2.2-F. Zonas de inundación modeladas en el sector Norte del volcán para un escenario tipo 2 (erupción vulcaniana tipo ca. 1550).

En la Fig. 3.5.12.2.2-F se recogen las zonas inundadas simuladas en un escenario tipo 2 para el caso de que los lahares ocurrieran hacia el norte del volcán. Los resultados son bastante similares a los del escenario 1, simplemente se amplían las zonas inundadas. Por ello todas las observaciones realizadas antes son aplicables ahora, siendo los puntos

más críticos (en cuanto a riesgo para las personas e infraestructuras de la zona) las instalaciones de acceso a Huilo-Huilo, amplias zonas de Neltume, confluencia quebrada Sin Nombre Norte con y el río Fui (viviendas y ruta 203), confluencia con estero Punahue y el aeródromo de Choshuenco.

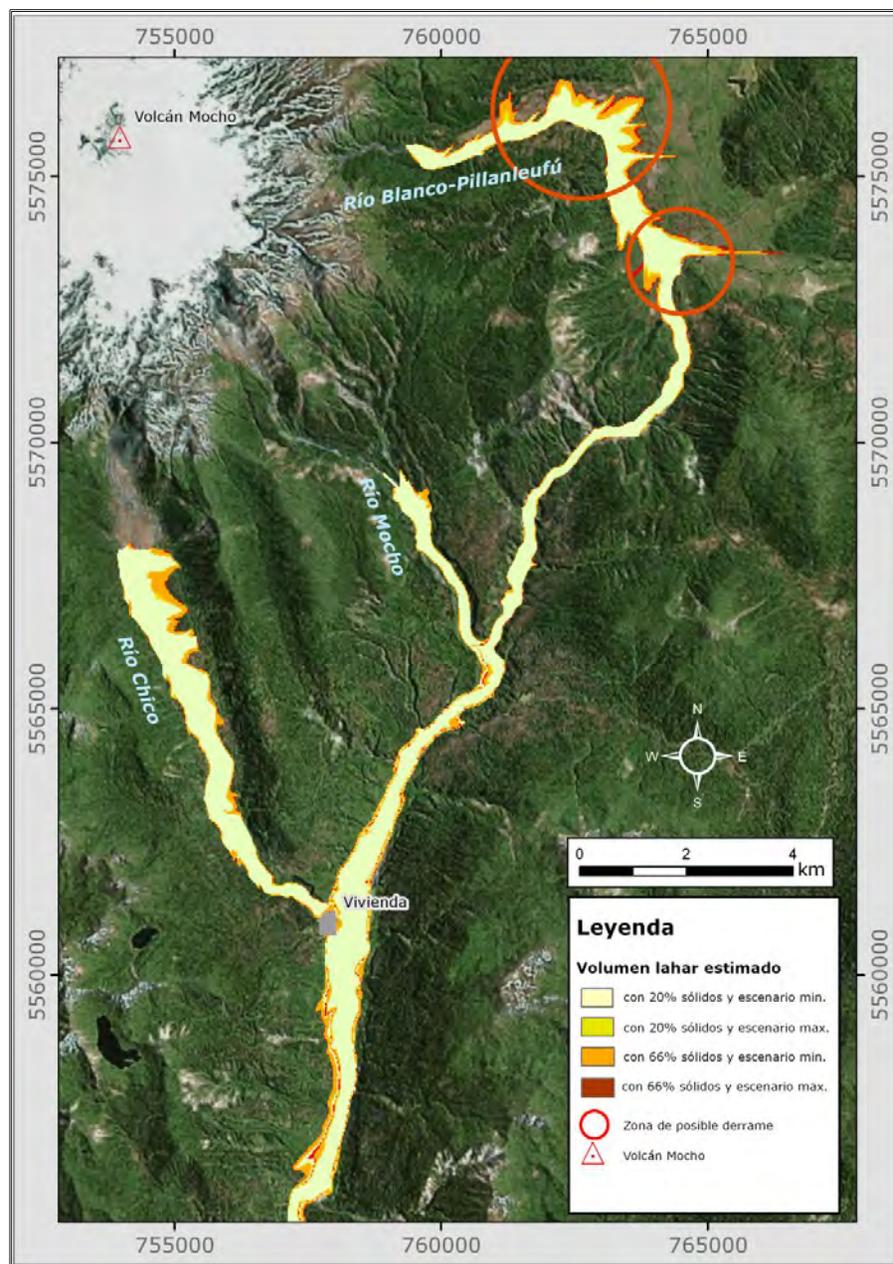


Fig. 3.5.12.2.2-G. Zonas de inundación modeladas en el sector Este-Sudeste (curso medio-alto) del volcán para un escenario tipo 2 (erupción vulcaniana tipo ca. 1550).

En cuanto a los cauces de los ríos Chico, Mocho y Blanco-Pillanleufú las diferencias respecto al escenario 1 no son excesivamente importantes en la parte media-alta, donde sigue estando en riesgo la casa situada en la confluencia con río Chicho. Simplemente el modelo parece indicar que en la pampa Pilmaiquén las zonas inundadas serán mayores.

En cambio más al sur (Fig. 3.5.12.2.2-H) en la zona inmediatamente anterior a la ruta T-559, desbordes que en el escenario 1 eran de relativa importancia se han convertido en una importante inundación hacia el fundo Arquihue. Aguas abajo, en la confluencia del Curringue, todas las casas situadas en la terraza inferior se verían gravemente afectadas. De manera similar el número de casas afectadas en la desembocadura es mayor.

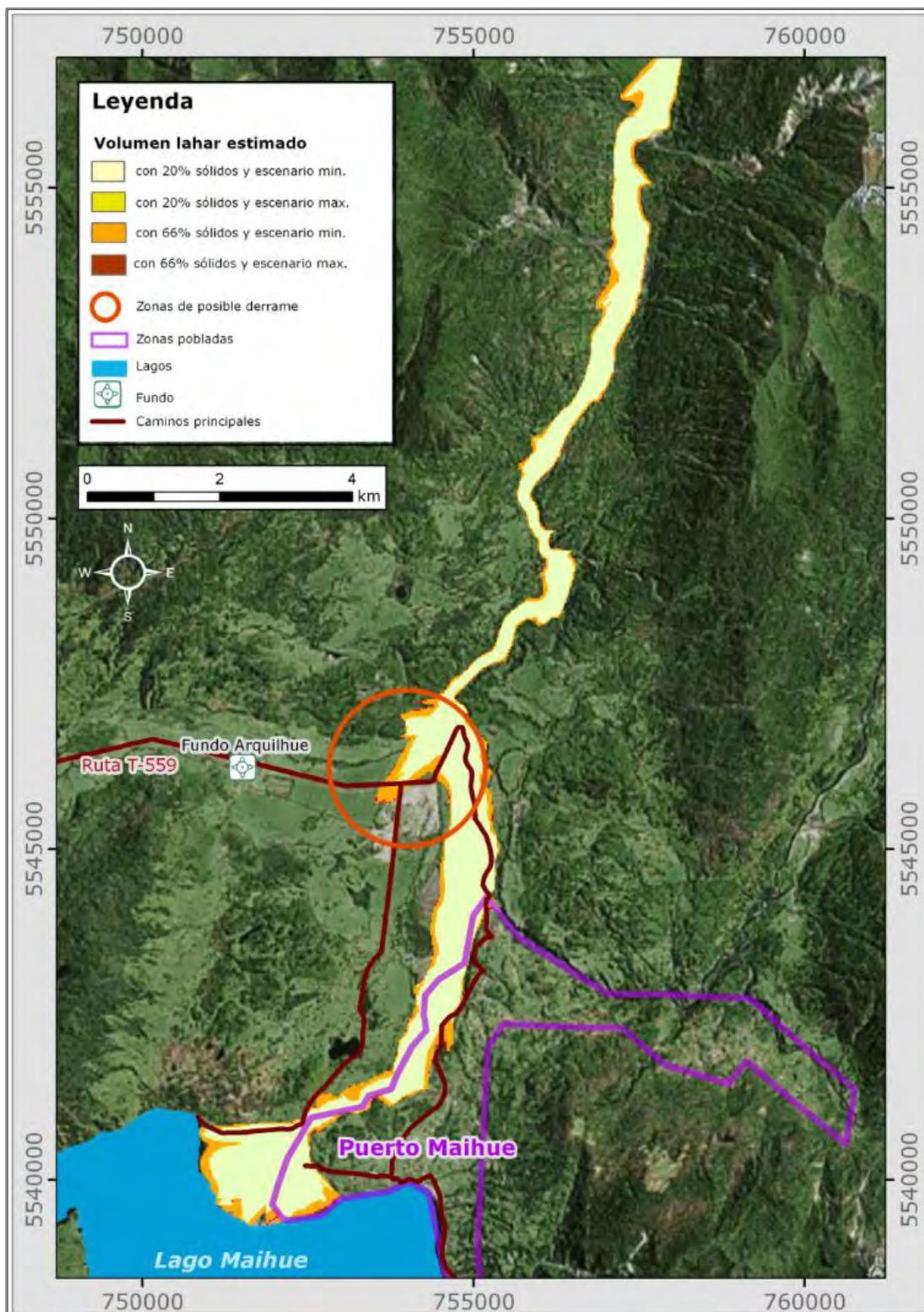


Fig. 3.5.12.2.2-H. Zonas de inundación modeladas en el sector Este-Sudeste (curso bajo) del volcán para un escenario tipo 2 (erupción vulcaniana tipo ca. 1550).

Escenario 3 (erupción vulcaniana-pliniana tipo Enco)

En las Figs. 3.5.12.2.2-I, J, K y L se muestran los resultados obtenidos para un escenario tipo 3 en los sectores de Enco (Fig. 3.5.12.2.2-I), Norte (3.5.12.2.2-J) y cuencas que drenan hacia el río Blanco-Pillanleufú (3.5.12.2.2-K y L).

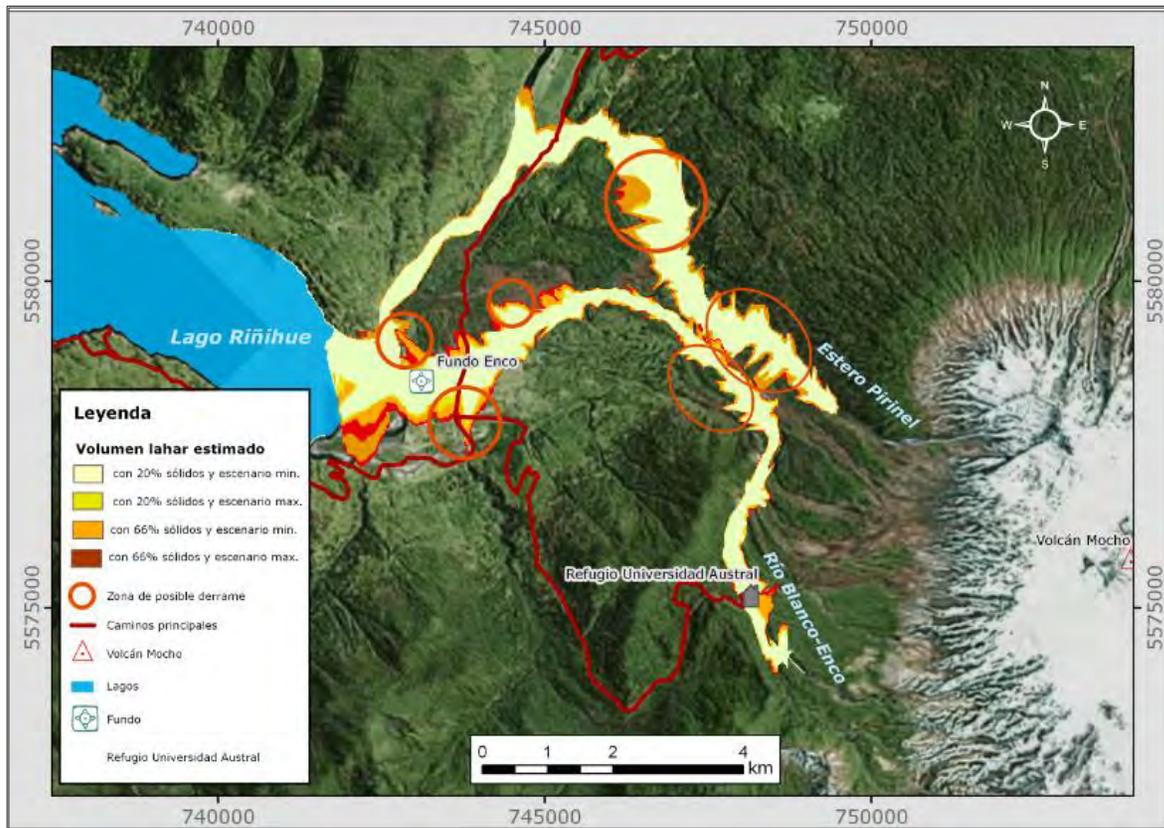


Fig. 3.5.12.2.2-I. Zonas de inundación modeladas en el sector de Enco para un escenario tipo 3 (erupción vulcaniana-pliniana tipo Enco).

En el sector de Enco estaríamos en un escenario en el que los cauces no pueden contener los caudales de los lahares y se producirían desbordes generalizados que inundarían toda el área.

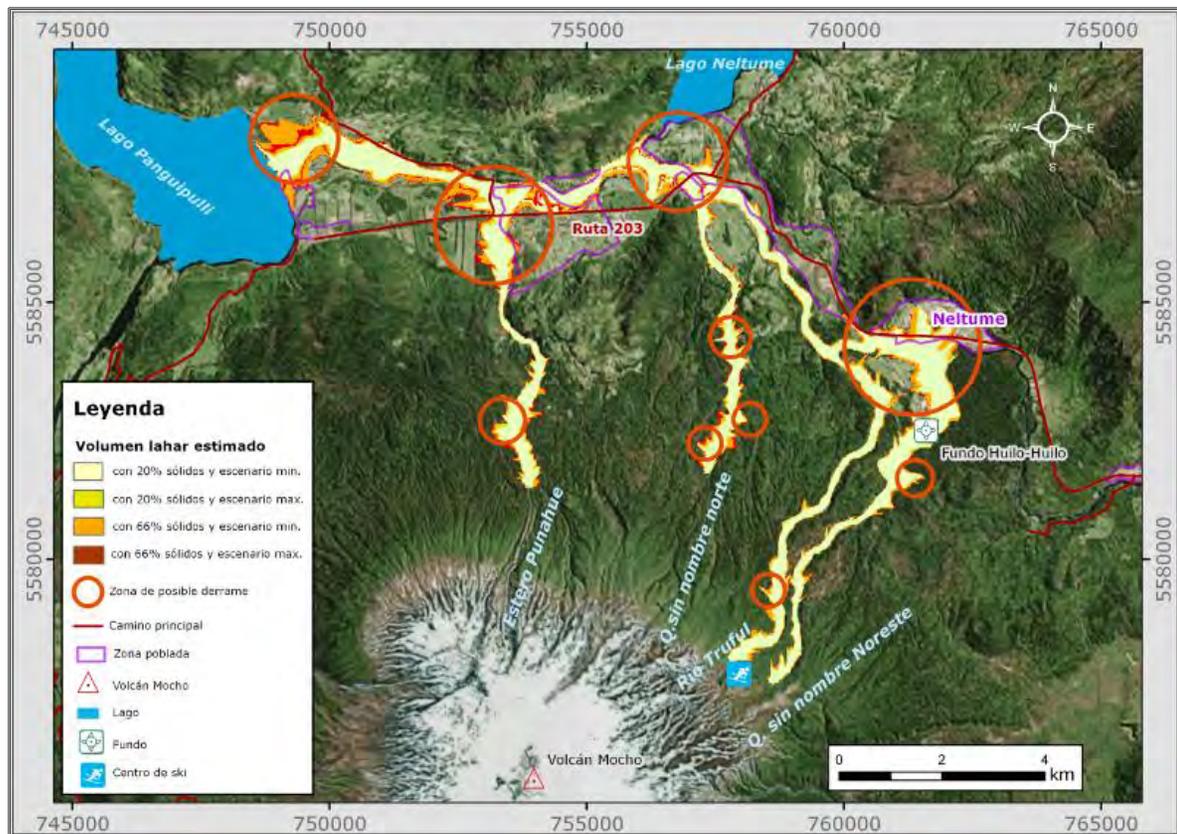


Fig. 3.5.12.2.2-J. Zonas de inundación modeladas en el sector Norte del volcán para un escenario tipo 3 (erupción vulcaniana-pliniana tipo Enco).

En cuanto a los cauces que drenan hacia el norte no se observan cambios significativos (respecto al escenario 2) en las zonas inundadas hasta la zona de confluencia con el estero Punahue. En este punto las zonas inundadas en algunos puntos de desborde se amplían de manera importante indicando una mayor área afectada, pudiendo afectar a las casas del abanico de Punahue o incluso a Choshuenco, tal y como indican los modelos MSF. También se amplían de manera considerable las zonas inundadas en la desembocadura del río Llanquihue en el lago Panquipulli, afectando de manera considerable al aeródromo de Choshuenco.

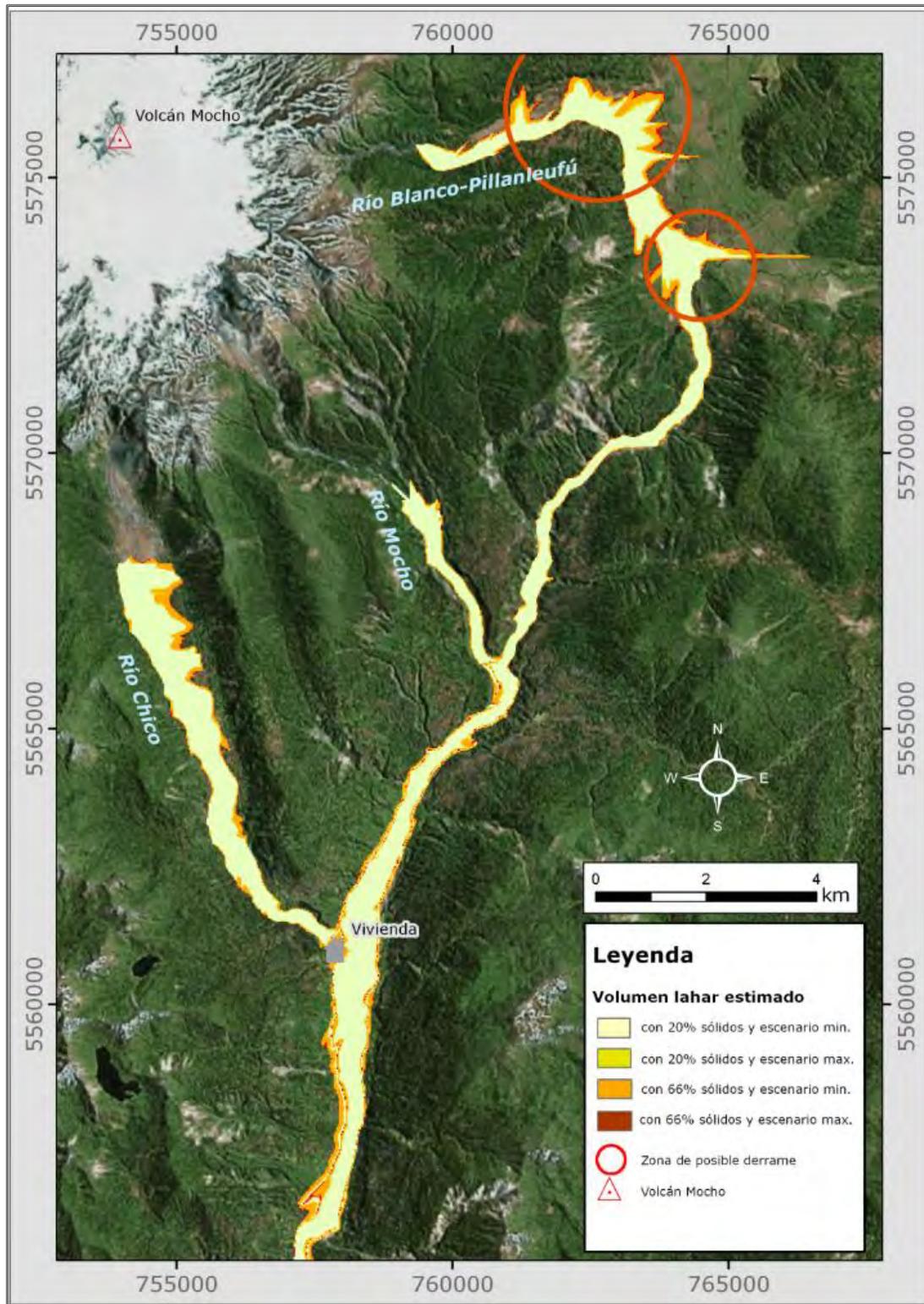


Fig. 3.5.12.2.2-K. Zonas de inundación modeladas en el sector Este-Sudeste (curso medio-alto) del volcán para un escenario tipo 3 (erupción vulcaniana-pliniana tipo Enco).

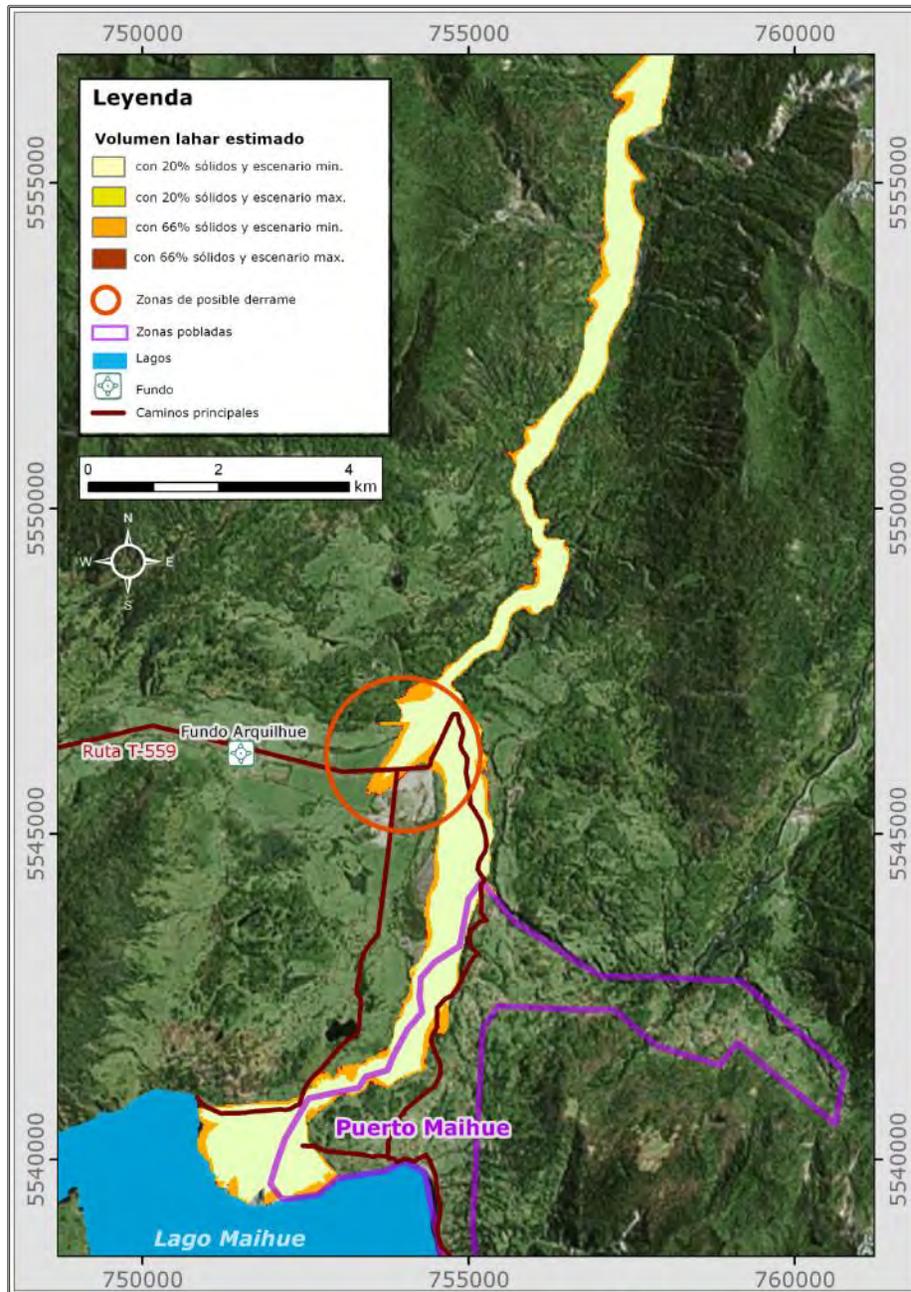


Fig. 3.5.12.2.2-L. Zonas de inundación modeladas en el sector Este-Sudeste (curso bajo) del volcán para un escenario tipo 3 (erupción vulcaniana-pliniana tipo Enco).

En el Sur, en las zonas de Arquihue y Maihue se acentúan los desbordes del escenario 2 pero no se observan nuevas zonas inundadas, siendo los puntos críticos el cruce de la ruta T-559, la confluencia del Curringue y la desembocadura en el lago Maihue.

Escenario 4 (erupción efusiva)

Referente al escenario 4 cabe hacer algunas consideraciones previas al análisis de los resultados. El volumen modelado correspondería al total del volumen estimado, esto quiere decir que todo ese volumen de hielo/nieve se fundiría de manera instantánea o en escasos minutos, hecho que no parece probable ya que la lava tardaría bastante más en fundir todo el espesor de hielo. Lo más probable es que el agua se fuese liberando a medida que se va fundiendo provocando lahares en diversos pulsos en función de la tasa de emisión de lavas del volcán. Tal como se ha indicado en el capítulo 3.5.8.2, según Hugo Moreno (comunicación personal) basándose en las observaciones del volcán Villarrica la tasa de emisión de lavas capaz de producir lahares se estima en 100 m³/s. Tasas de emisión superiores fundirían hielo/nieve a mayor velocidad y producirían lahares de mayor volumen.

Sin embargo y ante la imposibilidad de simular este proceso se ha optado por modelar la fusión instantánea de todo el volumen. Tal como se ha indicado esta asunción no parece probable pero queda del lado de la seguridad. No existen trabajos que ahonden en este tipo de escenario y que permitan estimar mejor los volúmenes fundidos y la velocidad a la que funden.

También se ha de indicar que un escenario de este tipo no afectaría al estero Punahue ya que la colada se simula desde la cima del Mocho y las que fluyeran hacia el Norte se desviarían hacia el estero Pirinel o el río Triful.

Teniendo en cuenta estas consideraciones en las Figs. 3.5.12.2.2-M, N, Ñ y O se muestran los resultados obtenidos para este escenario en los sectores de Enco (Fig. 3.5.12.2.2-M), Norte (3.5.12.2.2-N) y cuencas que drenan hacia el río Blanco-Pillanleufú (3.5.12.2.2-Ñ y O).

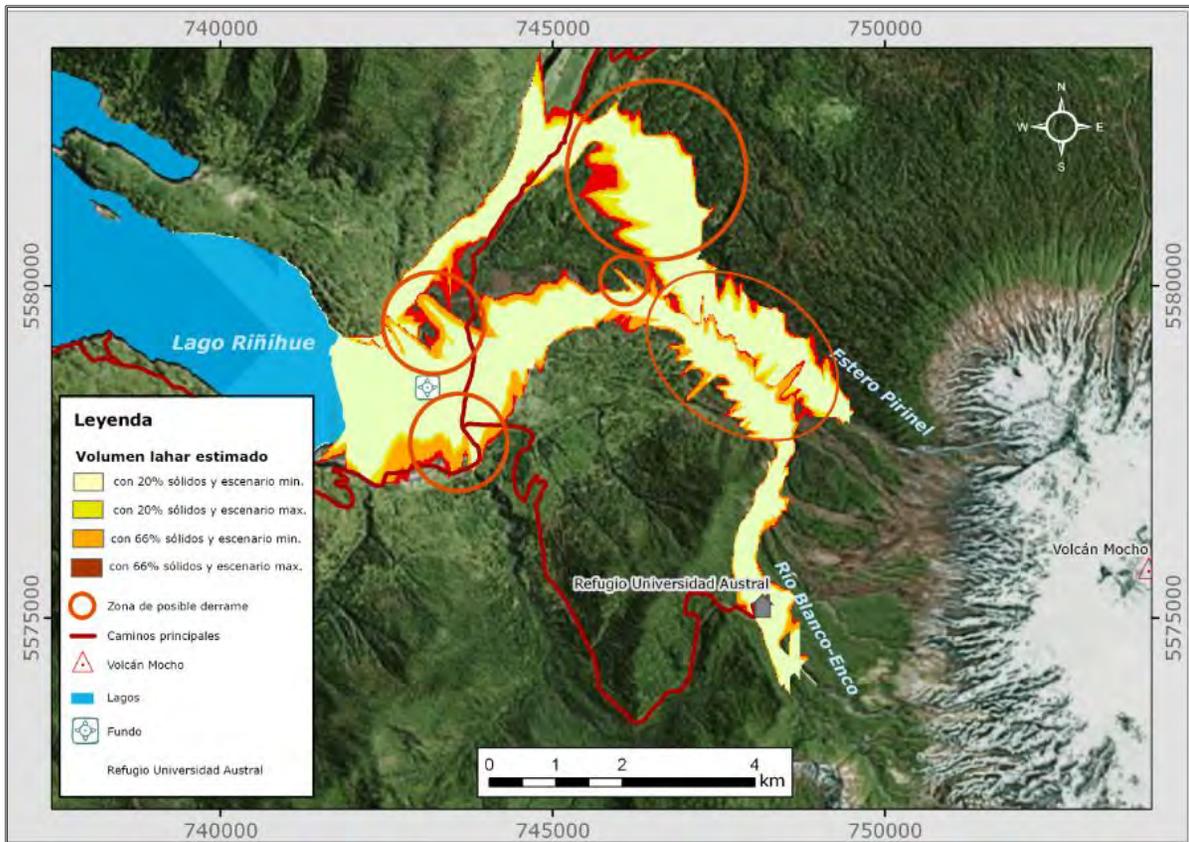


Fig. 3.5.12.2.2-M. Zonas de inundación modeladas en el sector de Enco para un escenario tipo 4 (erupción efusiva).

Tal como se muestra en la Fig. 3.5.12.2.2-M los desbordes en la zona de Enco serían generalizados, observándose una importante ascensión del flujo por el cauce del río Enco. En este escenario se acentúan las observaciones dadas para el resto de escenarios.

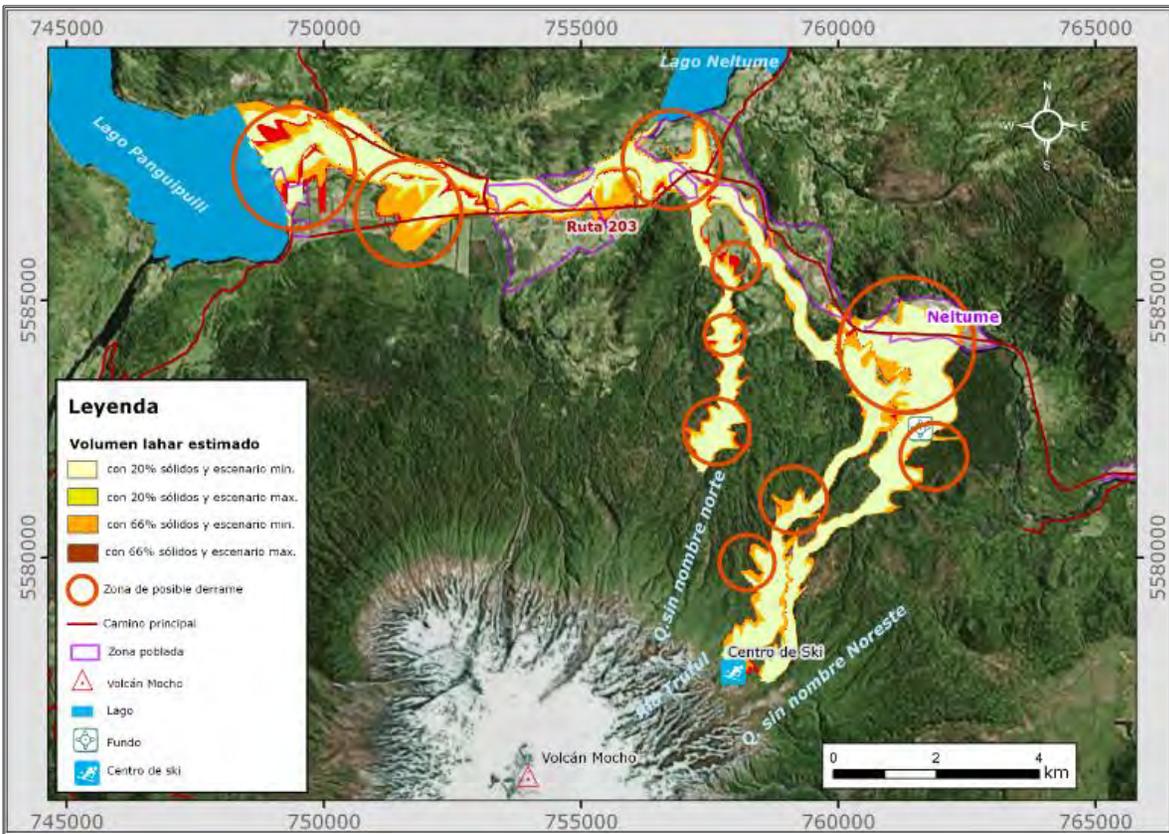


Fig. 3.5.12.2.2-N. Zonas de inundación modeladas en el sector Norte del volcán para un escenario tipo 4 (erupción efusiva).

En el sector Norte del volcán, dado el gran volumen simulado, los desbordamientos en los puntos críticos son muy grandes. Así la zona de Neitume y la entrada a la reserva Huilo-Huilo se verían gravemente afectados. En la zona de la confluencia del río Fui con la quebrada Sin Nombre Norte, a parte de las inundaciones ya comentadas en otros escenarios, se observa un importante derrame hacia el norte, al otro lado del río Fui que afectaría a las viviendas ahí situadas. Los desbordes a lo largo de la ribera izquierda del río Llanquihue serían importantes, llegando a afectar a un gran número de viviendas e incluso a la ruta 203. También se observa un gran derrame que alcanzaría el estero Chumpulli, afectando directamente a la localidad de Choshuenco. El sector del aeródromo se vería completamente cubierto.

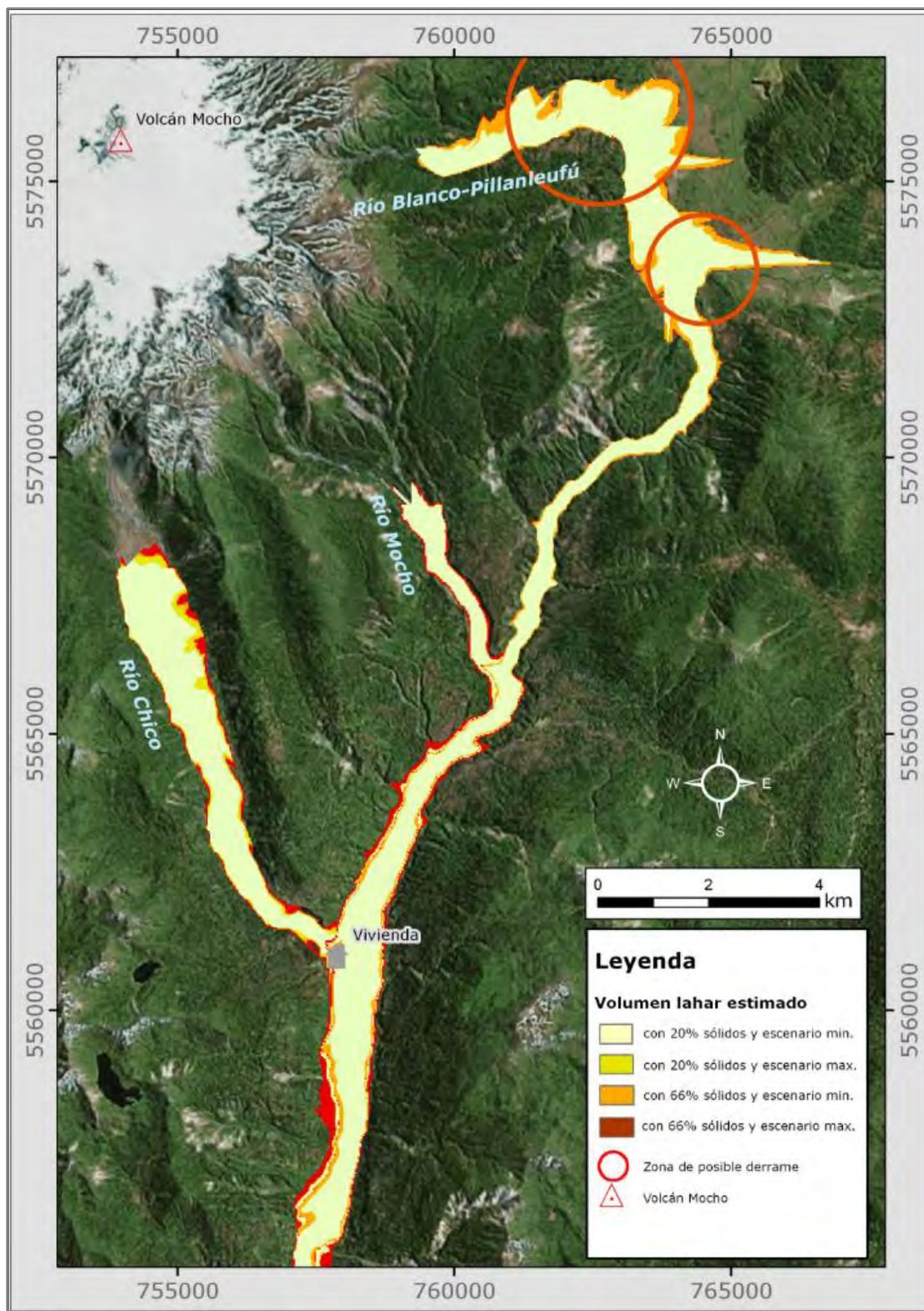


Fig. 3.5.12.2.2-Ñ. Zonas de inundación modeladas en el sector Este-Sudeste (curso medio-alto) del volcán para un escenario tipo 4 (erupción efusiva).

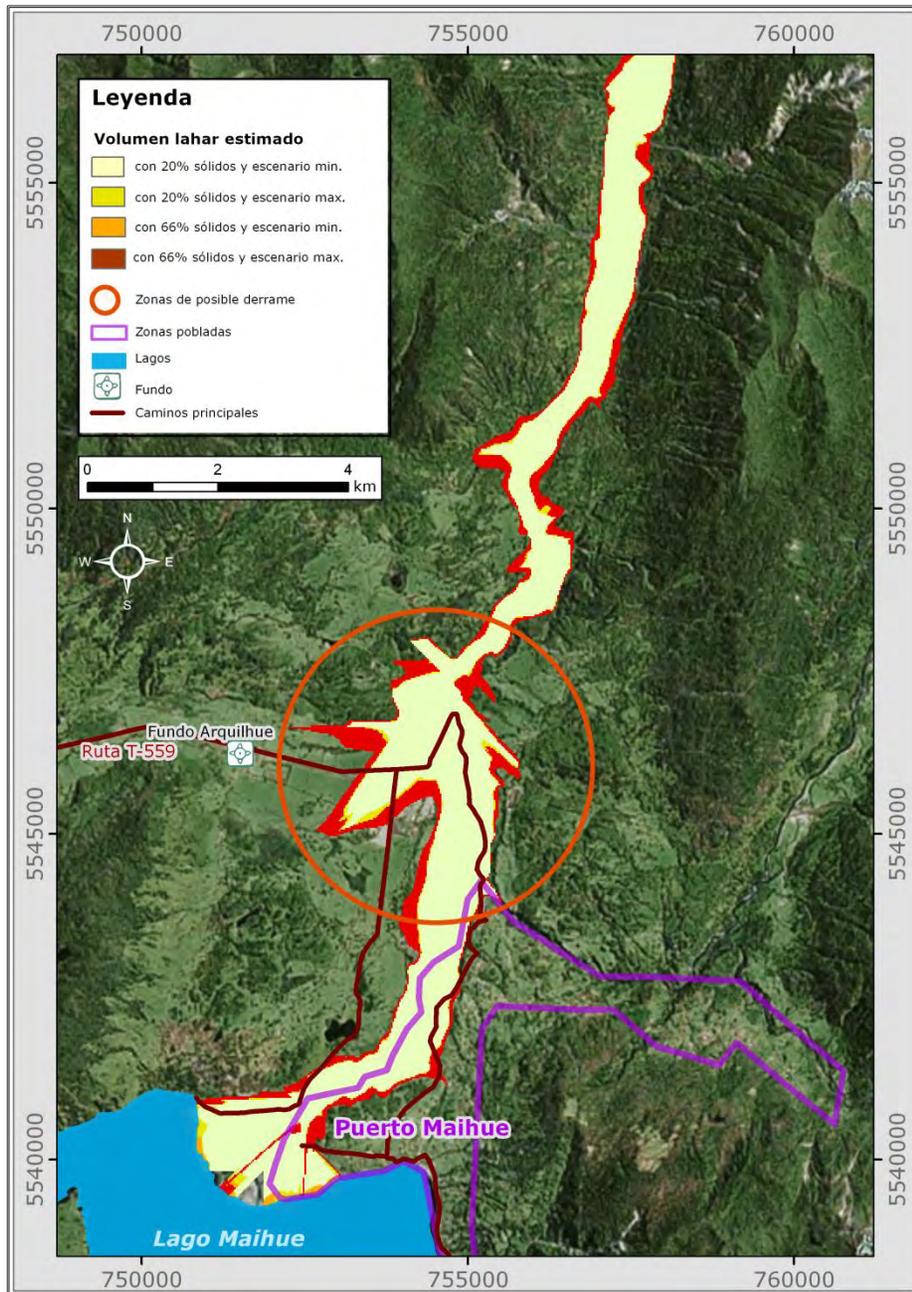


Fig. 3.5.12.2.2-O. Zonas de inundación modeladas en el sector Este-Sudeste (curso bajo) del volcán para un escenario tipo 4 (erupción efusiva).

En cuanto al sector sudeste remarcar que a lo largo de todo el valle la zona inundada es considerablemente más ancha, la afectación a la zona de Arquihue es muy importante. Sin embargo no muchas más casas de Puerto Maihue se verían afectadas respecto a las que sí lo estaban en el escenario 3.

En caso de que este escenario ocurriese tal y como se ha modelado, los volúmenes que arribarían a los lagos Riñihue, Panguipulli y Maihue serían muy importantes, produciendo probablemente una subida del nivel del lago y pudiendo provocar oleaje intenso.

3.5.12.3. **Modelación con MSF**

3.5.12.3.1 Introducción

"La explicación del modelo MSF que se recoge a continuación está basada en la traducción realizada por Castruccio en su tesis (2008)"

El modelo MSF (siglas de Modified Single – Flow Direction Model o Modelo de Flujo de Dirección Única Modificado) fue desarrollado por Huggel et al. (2003) para determinar las zonas de peligro asociadas a flujos de detritos generados por el desbordamiento de lagos glaciares en alta montaña. Fue aplicado por primera vez en los Alpes suizos y recientemente en el volcán Popocatepetl (Huggel et al., 2007) y el Iztaccíhuatl (Schneider, 2008), ambos en México.

El modelo está integrado en el ambiente ArcGIS y posee 2 componentes: trayectoria y distancia de corrida. La componente de trayectoria usa el algoritmo D8 que consiste básicamente en que desde una celda el flujo siga como trayectoria la dirección con mayor pendiente de entre las ocho celdas que le son adyacentes. Para zonas más planas, donde los flujos tienden a expandirse lateralmente, se agregó una función especial que permite al flujo desviarse de la dirección principal de mayor pendiente hasta 45° en ambos lados. Una vez que las zonas potencialmente afectadas por el paso de un flujo son delineadas, el programa también asigna un valor de probabilidad a cada celda del DEM, de ser afectadas por el flujo. Esta probabilidad está descrita por la función F_r que utiliza como principio el hecho que mientras más se desvíe una celda de la trayectoria de mayor pendiente, mayor es la resistencia. La razón H/F_r , donde H representa la distancia horizontal con respecto al punto de partida del flujo, determinado por el usuario, representa una función probabilística, y cada celda del DEM tiene asignada una probabilidad de ser afectada por el lahar, definida por (Huggel; 2003):

$$P_q(i) = H(i) / F_r(i)$$

$Pq(i)$ no es una función de probabilidad en sentido estricto, sino más bien una probabilidad cualitativa. La componente de distancia de corrida, a su vez, está dada por la relación V/L en que V es la distancia vertical que el flujo desciende y L es la distancia horizontal recorrida. La relación V/L debe ser definida por el usuario y debe corresponder al **“peor escenario”, esto es, la máxima extensión que podría tener un flujo en la zona** estudiada, de acuerdo a los datos de que se dispongan.

Problemas con el modelo pueden surgir a partir de errores en la dirección de flujo, que a su vez se originan en errores en el DEM. Estos errores o una resolución de celda insuficiente pueden provocar que el flujo se desvíe sustancialmente de la dirección de máxima pendiente. Aunque esto puede provocar desvíos del flujo no realistas, puede ocurrir que esos desvíos sean puntos críticos para la evaluación de riesgos y por ello deben ser adecuadamente chequeados.

De esta manera el procedimiento se establece de la siguiente manera:

1. Elección del DEM. Para el caso estudiado y según las indicaciones de Castruccio (2008) se ha escogido un DEM generado a partir de las curvas de nivel IGM de la zona.
2. Mejora de las curvas de nivel en aquellas zonas donde ha sido necesario. Especialmente en zonas llanas (Castruccio, 2008) y en zonas con rupturas de pendiente marcadas y conocidas que el software de interpolación no ha reproducido adecuadamente. Para ello se añadieron manualmente puntos de cota y curvas de nivel y además se delimitaron los lagos.
3. Interpolación del DEM a partir de las curvas de nivel mejoradas. Se escogieron dos métodos de interpolación del abanico de posibilidades que ofrece el software ArcGIS. El primero consistió en la utilización de la herramienta **“TopotoRaster” que genera un DEM directamente de los datos de entrada** (curvas de nivel y puntos de cota). El segundo método utiliza un TIN intermedio a partir del cual se interpola el DEM Raster.

Se optó por generar dos DEMs para que se complementaran mutuamente ya que ningún método de interpolación garantiza que el resultado refleje

exactamente la realidad.

4. Una vez generados los dos DEMs se procedió a hacer correr el programa para cada una de las cuencas y para cada DEM. De la comparación de resultados se pudo concluir que zonas ofrecen mayor posibilidad de ser afectadas por lahares y se descartaron aquellas zonas que se consideraron errores atribuibles al DEM.

El modelo MSF se utilizó en los mismos cauces que el modelo LAHARZ y con los mismos tipos de DEM. En todas las simulaciones se escogió un valor de H/L, que es el parámetro que determina la extensión que alcanza un lahar, tal que permitiera a los flujos alcanzar los lagos en que desembocan.

En todas las cuencas analizadas se definió como punto de partida el límite del glaciar en cada cuenca. Si bien los resultados de los distintos casos aparecen con probabilidades distintas, hay que tomar en cuenta que sólo son relativas y se miden en relación a las zonas simuladas con más alta y baja probabilidad de ser afectadas, mostrándose en colores que van del rojo al azul respectivamente.

3.5.12.3.2 Resultados

En las Figs. 3.5.12.3.2-A a la M se muestran los resultados obtenidos para cada cuenca.

En la Fig. 3.5.12.3.2-A se puede observar las zonas que el modelo considera inundables en la cuenca del río Blanco-Enco con una zona de inicio situada en el borde del glaciar pero en el sector más meridional. En la parte baja de la cuenca (imágenes inferiores) el modelo basado en TIN inunda la parte sur del abanico de Enco (geoforma en abanico del sector Enco), no saltando hacia los cauces situados más al norte. En cambio el modelo **basado en el DEM "topotoRaster" establece una comunicación con el estero Pirinel que si inunda todo el sector norte de Enco.** Sin embargo el modelo Topo no se sale del cauce principal por su margen sur, dejando sin inundar los campos situados en ese sector, que si son inundados en el modelo TIN. En la parte alta el refugio de la universidad Austral **no se ve afectado en el modelo DEM "topotoraster" y si con el basado en el TIN.** Las instalaciones de CONAF se ven afectadas en ambos casos.

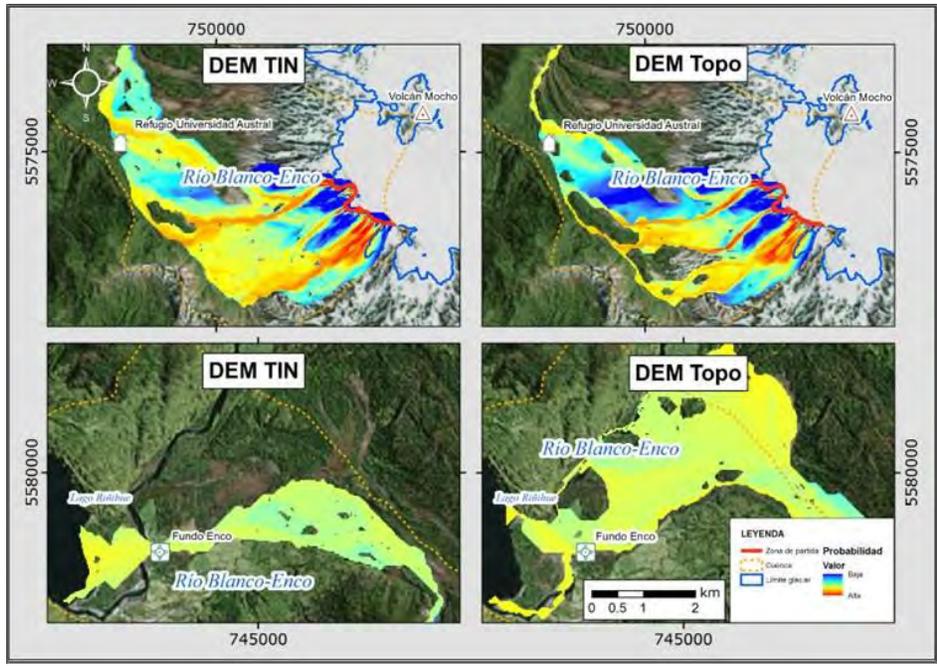


Fig. 3.5.12.3.2-A. Modelación río Blanco-Enco con los demos generados a partir con TIN y con la herramienta "TopoToRaster", situando la zona de partida en la zona meridional de la cuenca.

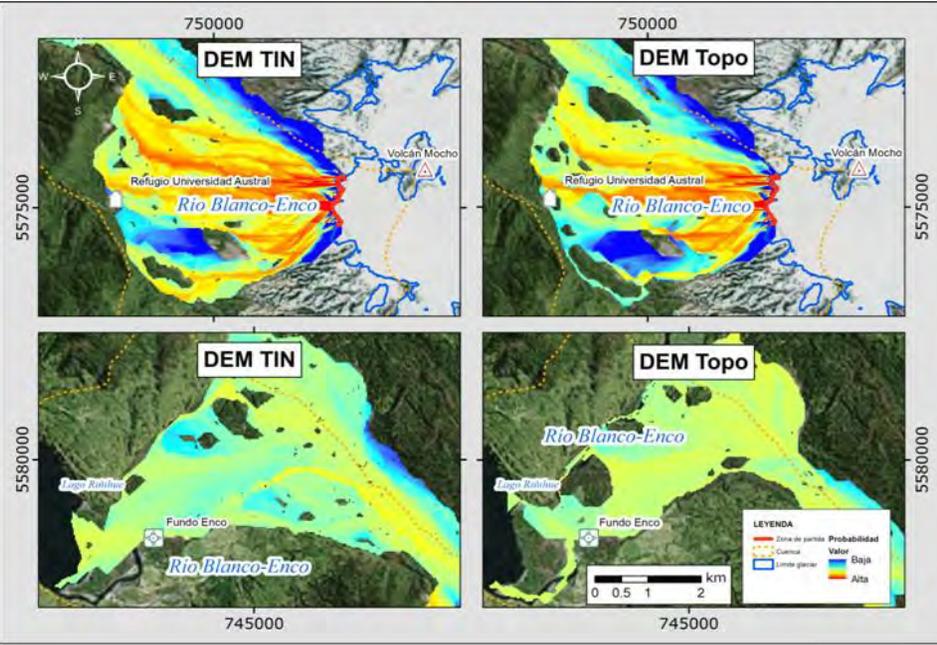


Fig. 3.5.12.3.2-B. Modelación río Blanco-Enco con los demos generados a partir con TIN y con la herramienta "TopoToRaster" situando la zona de partida en la zona septentrional de la cuenca.

En la Fig. 3.5.12.3.2-B se repite el modelo en la cuenca del río Blanco-Enco pero colocando la zona de partida de los lahares algo más al norte. En este modelo los resultados son similares, dándose el resultado que ambos modelos inundan ampliamente el sector de Enco. En este abanico el flujo tiende a salirse de los cauces principales y utiliza la amplia gama de cauces activos o semiabandonados existente en la zona.

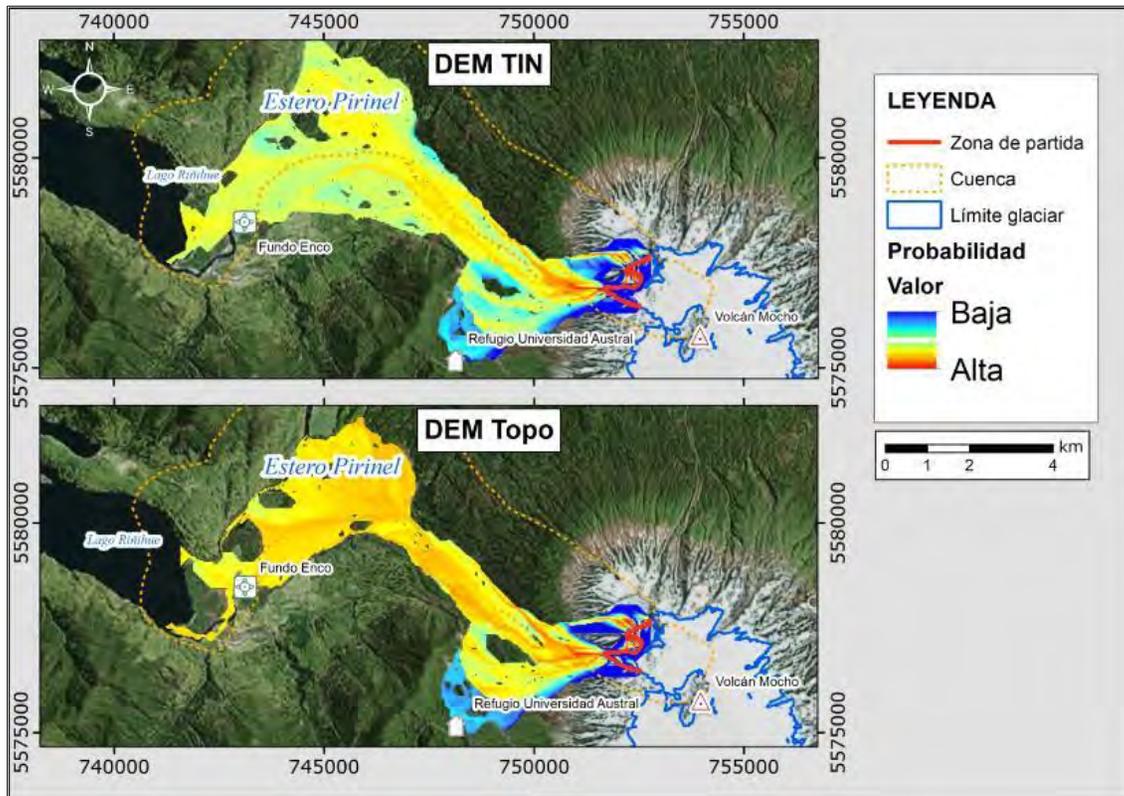


Fig. 3.5.12.3.2-C. Modelación estero Pirinel.

En el caso del estero Pirinel la afectación en la zona de Enco es similar a la del río Blanco-Enco. En la parte alta la probabilidad de que el refugio de la Universidad Austral se vea afectado es mucho menor. La simulación realizada indica que el DEM topo tiende a encauzar más los flujos (colores más anaranjados).

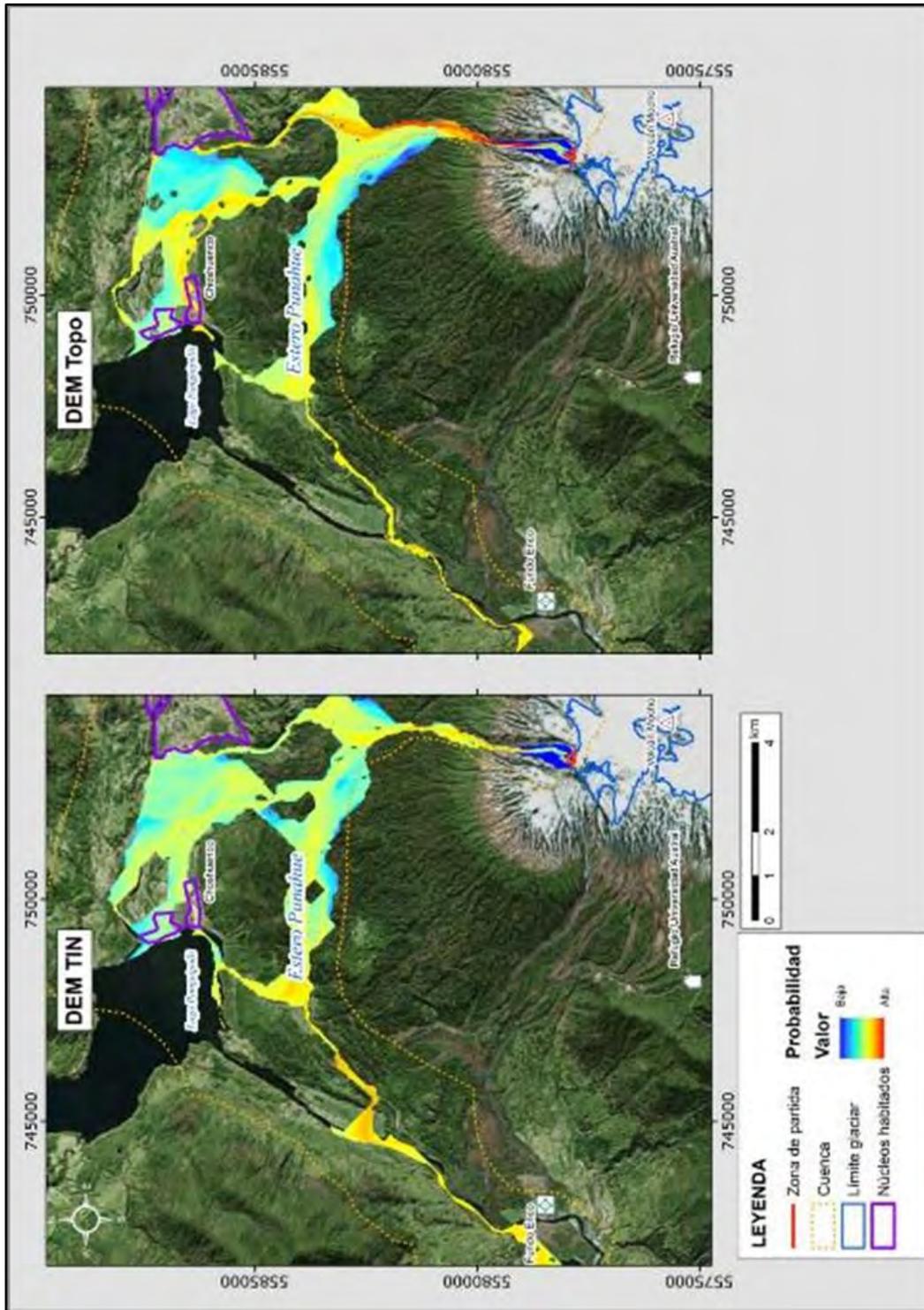


Fig. 3.5.12.3.2-D. Modelación estero Punahue, zona de partida en la base del Choshuenco.

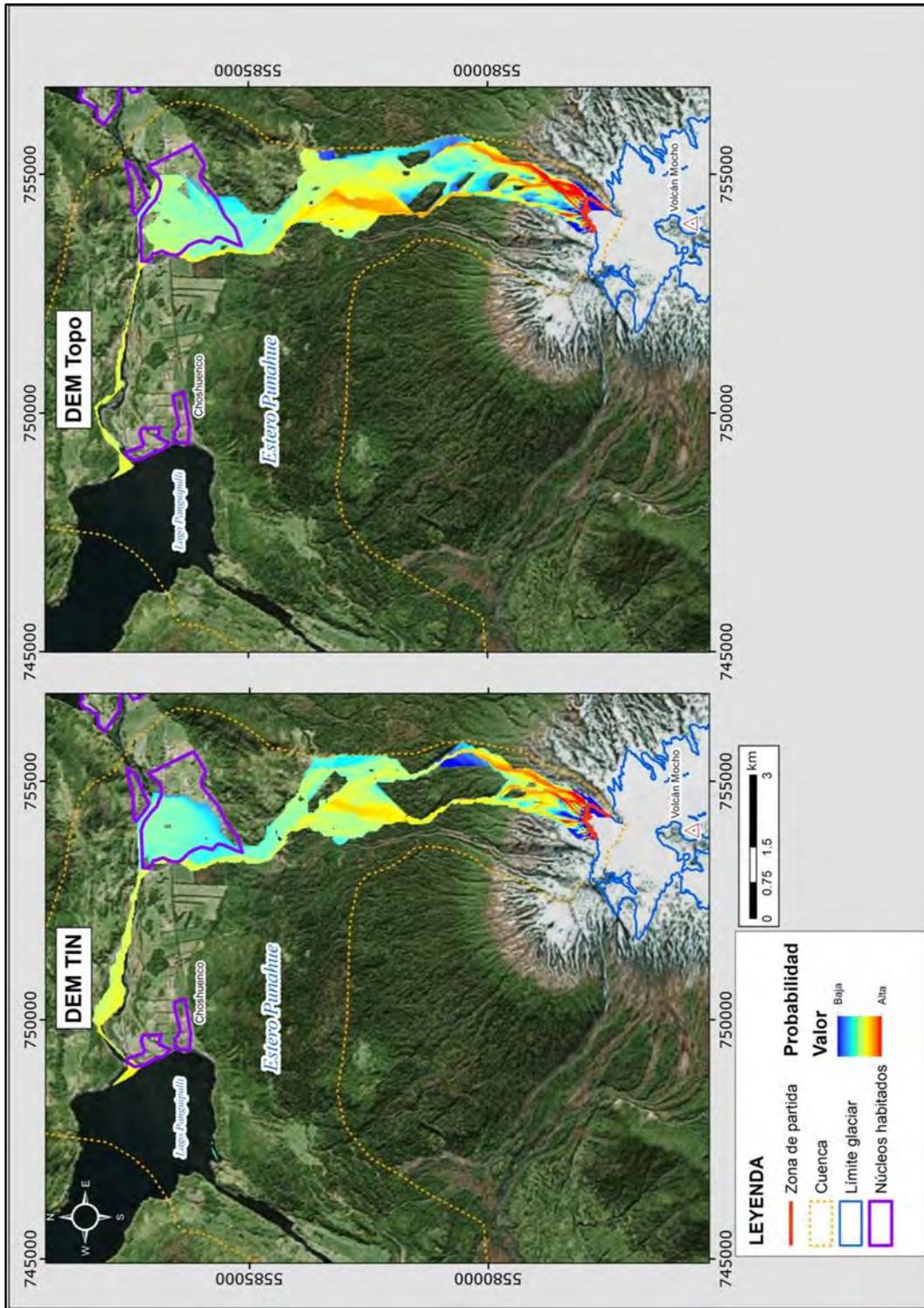


Fig. 3.5.12.3.2-E. Modelación estero Punahue, zona de partida más oriental.

Durante las primeras pruebas con el MSF en el estero Punahue se pudo observar que desde muy arriba nacen tres cauces principales que no permitían un análisis claro de las zonas inundables. Por ello se optó en dividir la zona de partida en dos. Si analizamos los resultados obtenidos de la zona de partida más occidental (bajo el volcán Choshuenco, Fig. 3.5.12.3.2-D) lo primero que llama la atención es que parte del flujo se desvía hacia el oeste, hacia la zona de Enco y el lago Panguipulli, en el sector de puerto Cancaguasi. En un principio se consideró este desvío como un error del DEM y por ello se mejoraron las curvas de nivel de ese sector intentando corregirlo, sin embargo tras las mejoras realizadas no se consiguió evitarlo por lo cual se consideró como una zona real de posible desvío de los flujos. Es de remarcar que se trata de un proceso que se da con ambos DEMs. El modelo realizado con LaharZ presenta varias secciones en esta zona que estarían indicando este posible desvío. Parte de este flujo que se desvía hacia el Oeste podría girar hacia el Norte y encauzarse por el estero Chumpulli, lo cual tendría una afectación directa a la localidad de Choshuenco, encontrándose en riesgo en caso de que lo indicado por la simulación sea correcto.

El cauce principal del estero Punahue llega al llano de Choshuenco a través de un abanico aluvial, probablemente formado por el propio estero. Aunque el curso actual se encaja en dicho abanico, ambos modelos indican que existe un riesgo de desbordamiento hacia la parte oriental de dicho abanico, afectando a las zonas agrícolas de ese sector y muy probablemente a la ruta 203, encontrándose en riesgo el puente sobre dicha ruta.

Si tenemos en cuenta la zona de partida situada más al este (Fig. 3.5.12.3.2-E) el flujo se canaliza por los cauces central y oriental, no observándose el desvío hacia el Oeste. En cuanto a la zona del abanico, donde el estero arriba al llano, ambos modelos indican desbordamiento hacia la parte más oriental del abanico, poniendo en riesgo las casas existentes en ese sector, como también a la ruta 203.

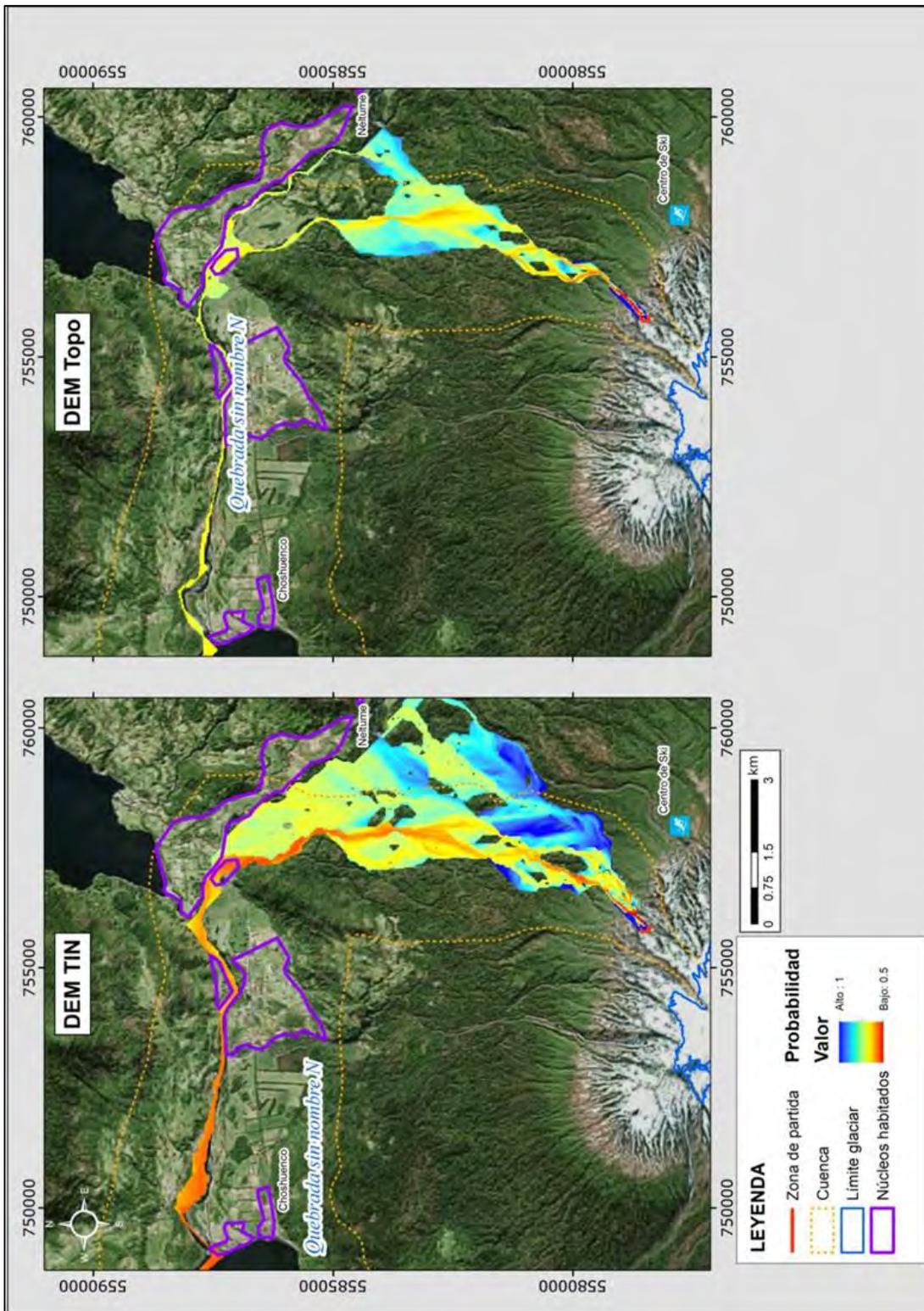


Fig. 3.5.12.3.2-F. Modelación Quebrada sin nombre Norte.

En la Fig. 3.5.12.3.2-F se muestra la modelación realizada de la quebrada Sin Nombre Norte. En este modelo se observa que con el DEM TIN las zonas inundables son mucho más extensas, encauzándose mucho más los flujos en el DEM Topo. El modelo TIN presenta un desvío importante hacia el este, hacia el fundo Huilo-Huilo, aunque no parece probable que afecte a las instalaciones de entrada al parque, ya que el cañón del río Truful lo absorbería. Ambos modelos inundan la zona donde la ruta 203 cruza el río Fui y la quebrada Sin Nombre Norte, donde la topografía en la zona de la quebrada es más abierta. En este sector existen algunas casas que podrían estar en peligro. A partir de ese punto ambos modelos parecen indicar que el cauce del río Llanquihue es capaz de absorber el flujo, si bien tal como indican los modelos realizados con LaharZ desbordamientos localizados pueden darse en diversos puntos, especialmente en el sector La Isla y el aeródromo de Choshuenco.

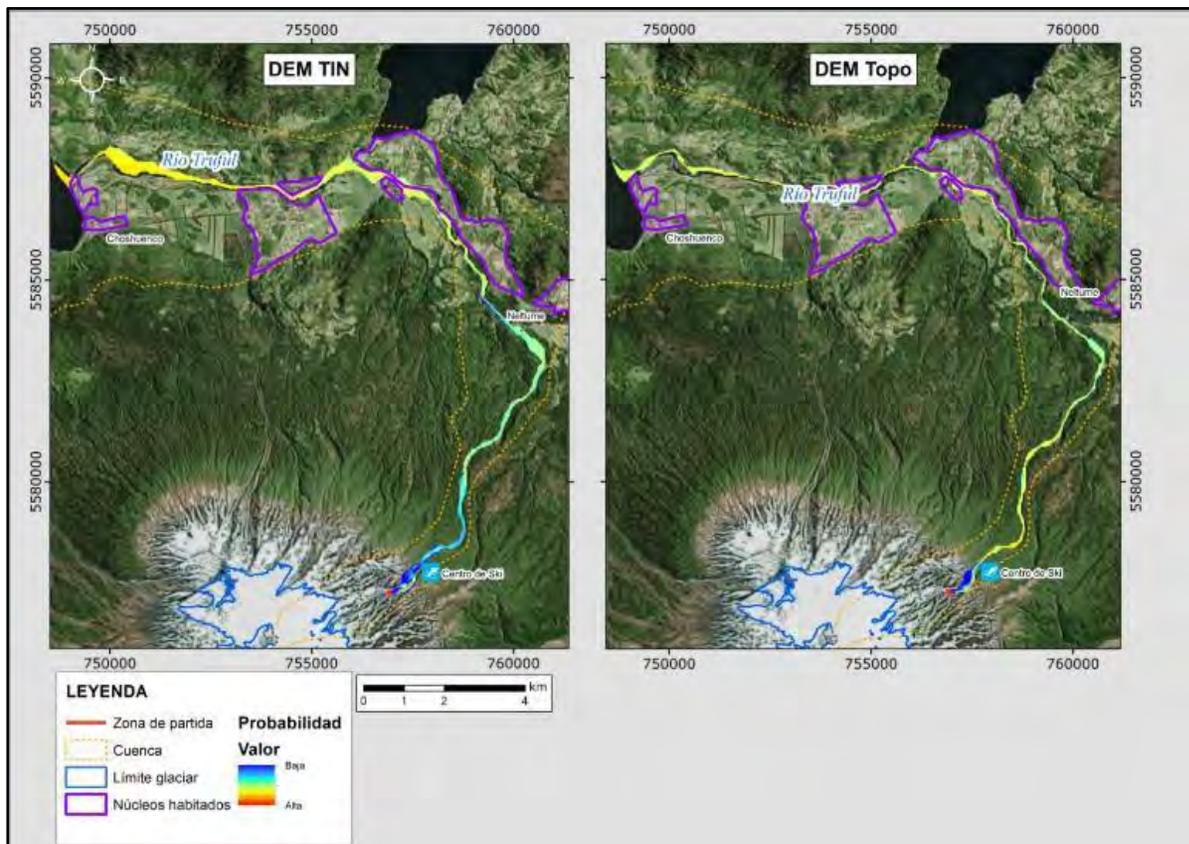


Fig. 3.5.12.3.2-G. Modelación río Truful.

En cuanto al río Triful (Fig. 3.4.12.3.2-G), ambos modelos no indican grandes desbordamientos, hecho que se atribuye a que la mayor parte de su recorrido el Triful discurre por un profundo cañón. En la parte alta pueden verse afectadas algunas instalaciones del centro de Ski de Huilo-Huilo. Tal como ocurre en la quebrada Sin Nombre Norte el sector del puente de la ruta 203 sobre el río Fui se encuentra en riesgo. En la Fig. 3.5.12.3.2-H se muestra la modelación realizada para la quebrada Sin Nombre Noreste. Para este caso se observan diferencias importantes entre las dos simulaciones realizadas. El modelo basado en el DEM Topo muestra un encauzamiento importante del flujo en la parte alta y aunque no parece que vaya a afectar a las instalaciones del Centro de Ski se considera conveniente estudiarlo en detalle. Se observa un desbordamiento importante en la zona llana que hay en la entrada al fundo Huilo-Huilo que podría afectar a las instalaciones que allí se encuentran. Siguiendo con este modelo se observan algunos píxeles inundados dentro del perímetro de Neltume, píxeles que estarían indicando la inundación marcada en los modelos LaharZ. También se observa un derrame a favor del estero Llallarca que también parece indicar el modelo LaharZ. Aunque esto no parece probable y se atribuye a un error del DEM, es conveniente estudiarlo en detalle.

En cuanto al modelo basado en el DEM TIN se observa un derrame en el sector situado al noreste del centro de ski que se encauza por la quebrada Honda y continúa por el río Fui hasta Neltume. Aunque en principio se consideró un error en el DEM, las mejoras introducidas en ese punto evitaron el desvío en el caso del DEM Topo pero no en el TIN, con lo cual se recomienda estudiar este punto con especial detalle ya que podría afectar a Neltume debido al menor encajonamiento del río Fui a su llegada a la localidad. Por el cauce principal de la quebrada Sin Nombre Noreste también se observan desbordamientos importantes hacia la entrada de la reserva Huilo-Huilo que también afectarían a partes de Neltume. Es de remarcar que este modelo no marca el desvío hacia el estero Llallarca. A partir de Neltume ambos modelos parecen indicar que el cauce del río Llanquihue es capaz de absorber el flujo, si bien tal como indican los modelos realizados con LaharZ desbordamientos localizados pueden darse en diversos puntos, especialmente en el sector La Isla y el aeródromo de Choshuenco.

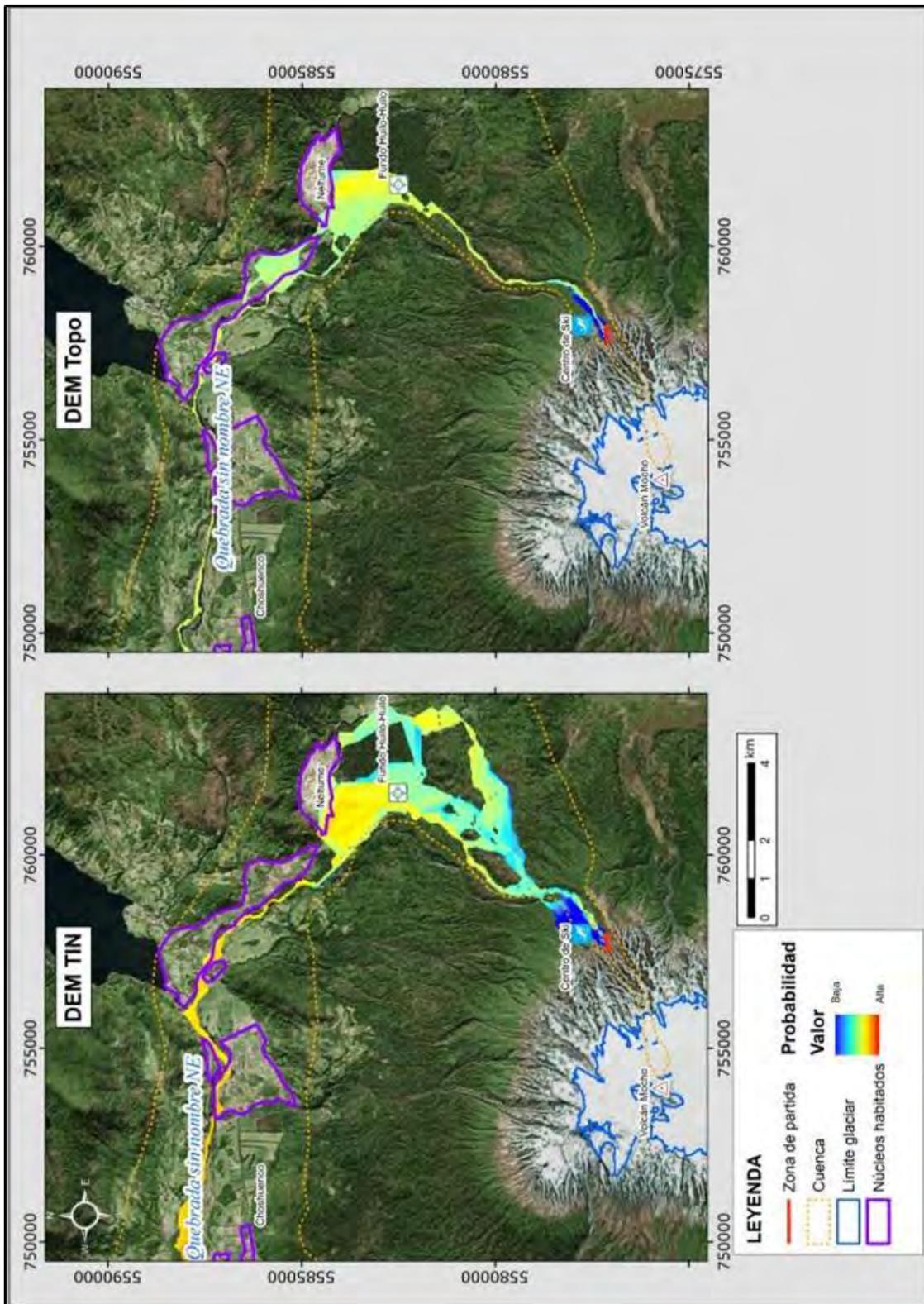


Fig. 3.5.12.3.2-H. Modelación Quebrada Sin Nombre Noreste.

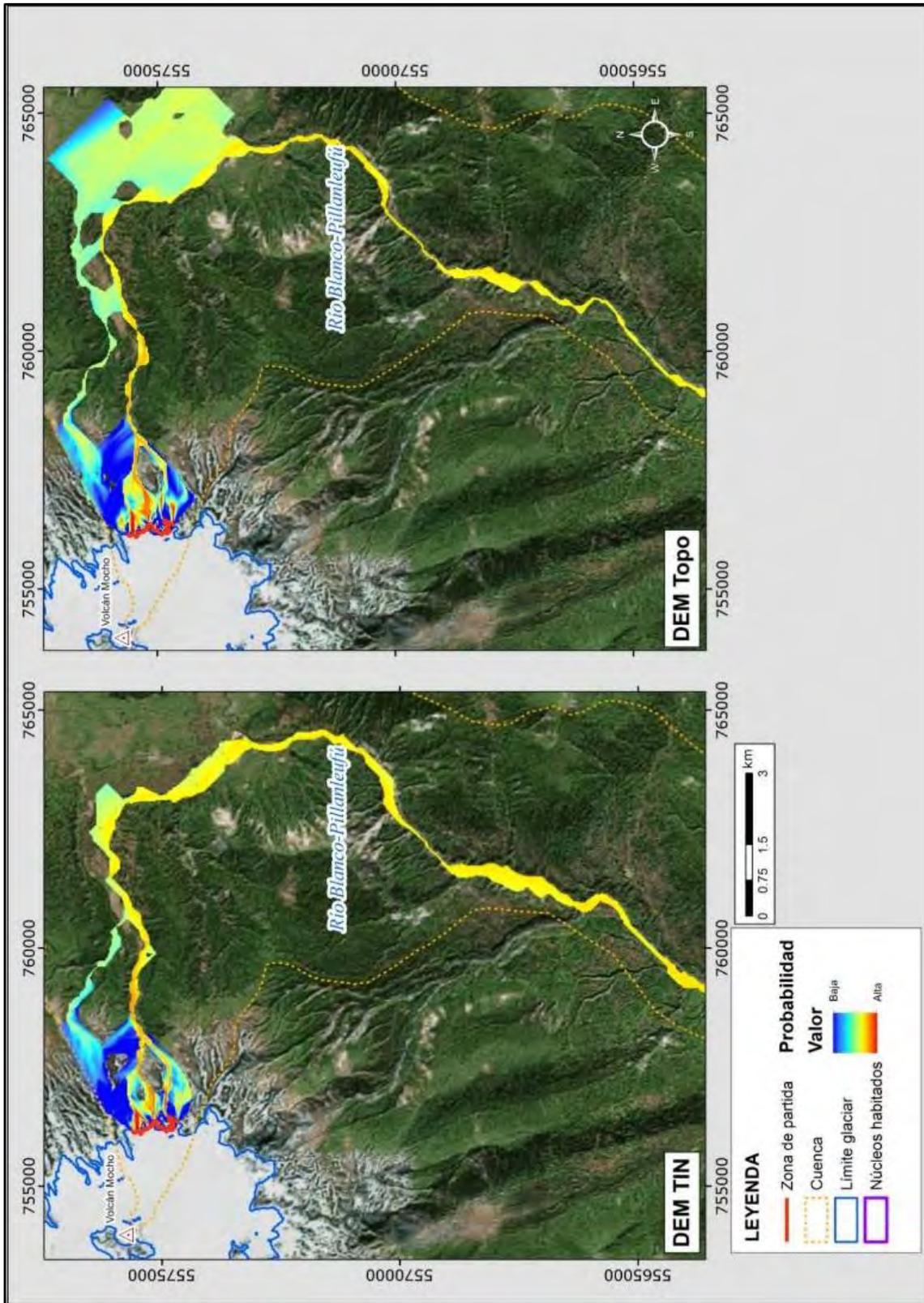


Fig. 3.5.12.3.2-I. Modelación río Rio Blanco Pillanleufú, sector alto.

El modelo realizado para el valle del río Blanco-Pillanleufú se puede interpretar como un único modelo con tres zonas de partida (nacientes del río Blanco, río Mocho y río Chico) ya que aguas debajo de las diferentes confluencias el comportamiento es idéntico. Así en la Fig. 3.5.12.3.2-I se muestra el curso alto del Río Blanco, en la Fig. 3.5.12.3.2-J el del Mocho y en la Fig. 3.5.12.3.2-K el Chico. Las zonas de inundación a partir de la confluencia de los tres cauces se muestran en las Figs. 3.5.12.3.2-L (curso medio) y 3.5.12.3.2-M (curso bajo), donde se muestra la zona de Arquihue y Maihue.

Tal como se puede en la Fig. 3.5.12.3.2-I la principal diferencia entre el modelo TIN y el Topo en el curso alto del río Blanco es que el modelo Topo inunda ampliamente la pampa de Pilmaiquén y el TIN no. A lo largo del valle el modelo TIN inunda una zona más amplia, fenómeno que se atribuye a triángulos bastante planos en el fondo. Los modelos que nacen en los ríos Mocho y Chicho ofrecen resultados similares. En la confluencia del río Chico con el valle principal existe una vivienda que se encontraría en riesgo en todas las modelaciones. Aguas abajo de este punto el flujo se encuentra bastante encauzado en el fondo del valle. En la zona de Arquihue-Maihue el río es cruzado por el puente de la ruta T-559 por lo que se recomienda estudiar como los flujos lo afectarían. A partir de este puente, en la zona de confluencia con el río Curringue, encontramos algunas casas que podrían estar en riesgo en función de su altura relativa respecto al río, tal como se preveía en los modelos LaharZ.

En la zona de la desembocadura en el lago Maihue el río Blanco forma un delta en el que se encuentran algunas casas que estarían en riesgo.

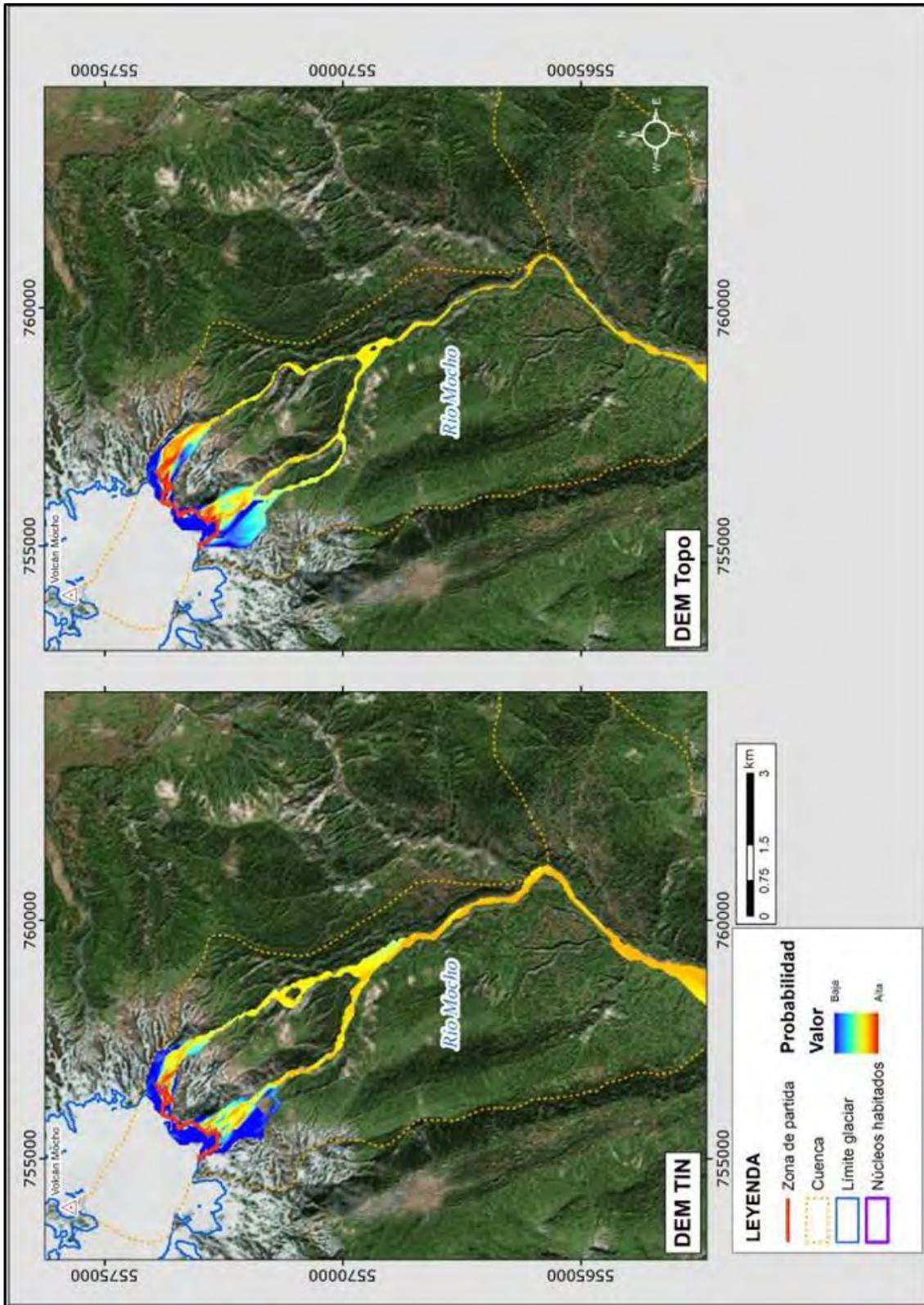


Fig. 3.5.12.3.2-J. Modelación río Rio Mocho, sector alto.

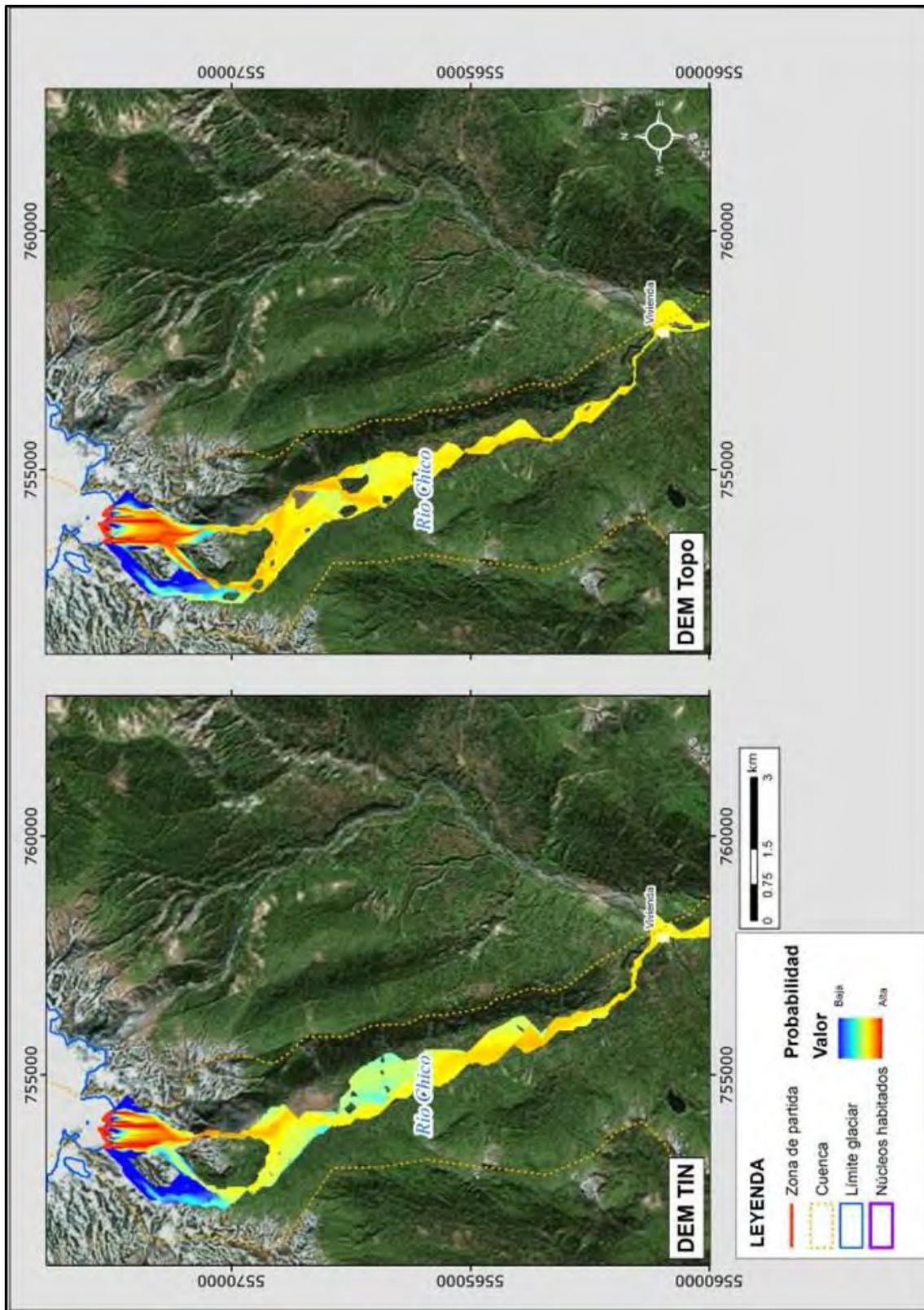


Fig. 3.5.12.3.2-K. Modelación río Rio Chico, curso alto.

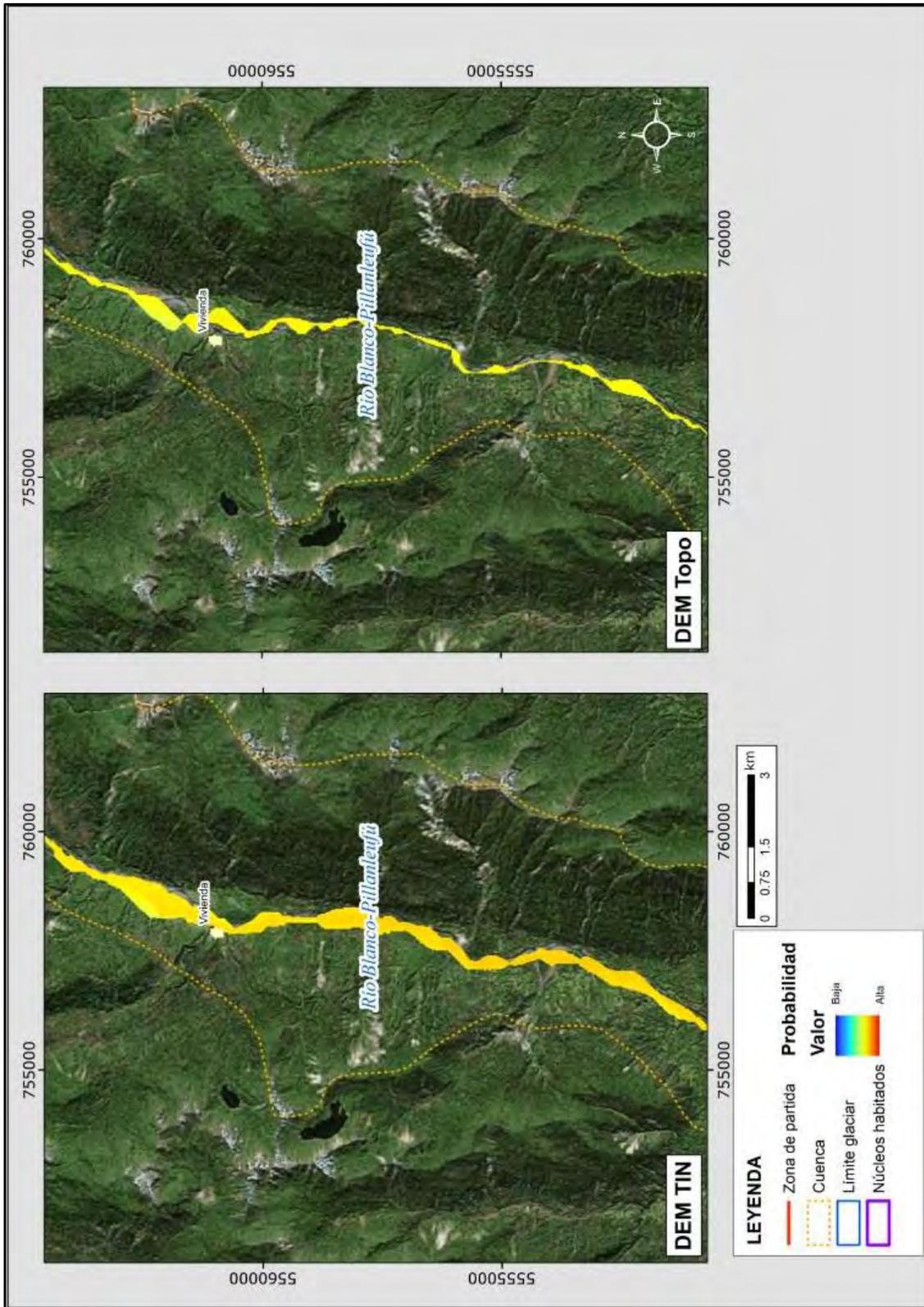


Fig. 3.5.12.3.2-L: Modelación río Blanco-Pillanleufú, sector medio.

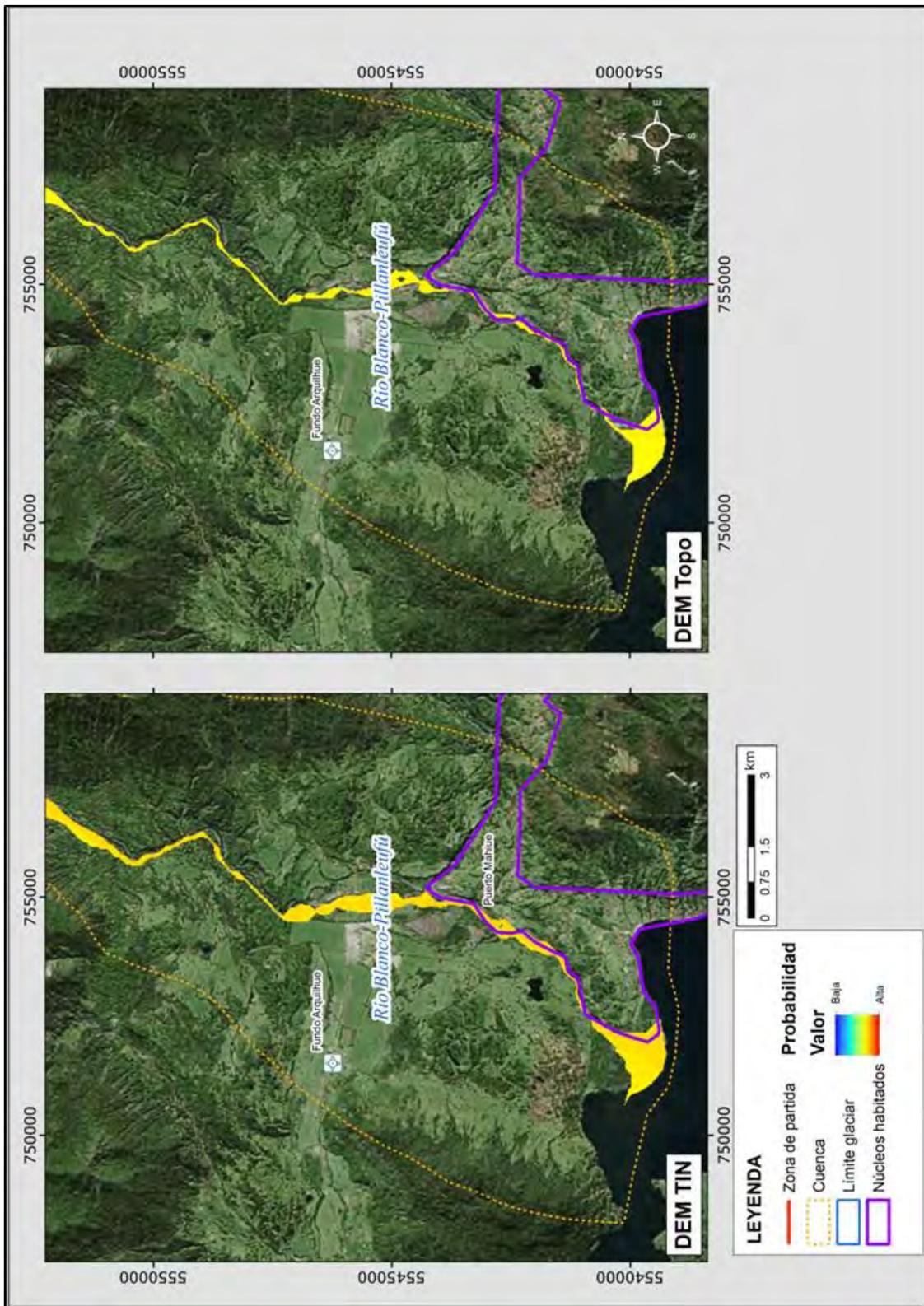


Fig. 3.5.12.3.2-M. Modelación río Rio Blanco-Pillanleufú, sector Maihue.

3.5.13. Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos en ambas modelaciones se ha elaborado un mapa de peligros por lahares para el complejo volcánico Mocho-Choshuenco. En el momento de interpretar este mapa se han de tener en cuenta una serie de consideraciones ya que un mapa de riesgos no refleja lo que ocurrirá en caso de una erupción, sino lo que puede ocurrir. Esto es debido a que en su elaboración han de realizarse simplificaciones y asunciones que no siempre reflejan la realidad con exactitud.

Se debe subrayar que los escenarios eruptivos no representan exactamente el tamaño de una erupción « tipo » del volcán, y deben considerarse como rangos de variación de los fenómenos analizados. Estos escenarios han sido elaborados a partir del mejor conocimiento existente del volcán y de la interacción glaciovolcánica. De igual manera, se debe recalcar que las cifras de los volúmenes de los potenciales lahares, para cada **escenario, deben ser consideradas como indicativas de un "orden de magnitud" y no** como estimaciones de un evento volcánico preciso.

Este estudio se centra en los lahares que pudieran descender por las laderas del volcán y no tiene en cuenta los riesgos provocados por otras manifestaciones volcánicas (flujos de piroclastos, caída **de cenizas, flujos de lava,...)** que en varios de los escenarios modelados suponen una amenaza mayor, ya sea por su mayor poder destructivo o por afectación a áreas más extensas. Para estos riesgos se remite al lector al Mapa de Peligros del Complejo Volcánico Mocho-Choshuenco elaborado por Moreno y Naranjo (2006).

Una limitación que presentan los programas utilizados es que no permiten representar los lahares que ocurren en diferentes pulsos, por lo cual los modelos realizados representarían un caso extremo, en que todo el volumen del lahar desciende en un único pulso. Los sedimentos dejados por los primeros pulsos cambiarían la topografía, lo que afectaría a los pulsos siguientes que tendrían que erosionar esos sedimentos o buscar otros caminos y como resultado de ello se verían afectadas nuevas zonas por la inundación.

Referente al escenario 4 cabe hacer algunas consideraciones previas al análisis de los resultados. El volumen modelado correspondería al total del volumen estimado, esto quiere decir que todo ese volumen de hielo/nieve se fundiría de manera instantánea o en escasos minutos, hecho que no parece probable ya que la lava tardaría bastante más

fundir todo el espesor de hielo. Lo más probable es que el agua se fuese liberando a medida que se va fundiendo provocando lahares en diversos pulsos en función de la tasa de emisión de lavas del volcán. Tal como se ha indicado en el capítulo 3.5.8.2, según Hugo Moreno (comunicación personal) basándose en las observaciones del volcán Villarrica la tasa de emisión de lavas capaz de producir lahares se estima en $100 \text{ m}^3/\text{s}$. Tasas de emisión superiores fundirían hielo/nieve a mayor velocidad y producirían lahares de mayor volumen.

Sin embargo y ante la imposibilidad de simular este proceso se ha optado por modelar la fusión instantánea de todo el volumen. Tal como se ha indicado esta asunción no parece probable pero queda del lado de la seguridad. No existen trabajos que ahonden en este tipo de escenario y que permitan estimar mejor los volúmenes fundidos y la velocidad a la que funden.

Para la elaboración del mapa de peligros se comenzó a partir de las zonas máximas de inundación para cada escenario modelado con LaharZ para posteriormente añadirles las zonas modeladas con MSF y finalmente realizar una revisión crítica eliminando en cada escenario las zonas que se consideraron como poco probables de ser inundadas. Al confeccionar los mapas se pudo comprobar que las zonas inundadas para los escenarios 1, 2 y 3, modelados con LaharZ, variaban poco. Dado la imprecisión intrínseca de estos modelos se optó por utilizar el que más área inundaba (escenario 3) y definirlo como de alto peligro de ser inundada en una erupción explosiva como las ocurridas en el volcán durante los últimos 2000 años.

El cuarto modelo (escenario 4) se mantuvo como escenario diferenciado ya que los procesos generadores de flujos laháricos son muy diferentes. Por lo tanto en el modelo LaharZ se diferencian dos zonas de peligro:

1. Zona con alto peligro de ser inundadas por lahares en una erupción explosiva como las ocurridas en el volcán durante los últimos 2000 años.
2. Zona con alto peligro de ser inundadas por lahares en una erupción efusiva con tasa de emisión de lavas elevada.

En la Fig. 3.5.13-A se muestra las zonas de inundación generadas por los escenarios 3 y 4 del modelo LaharZ y las zonas inundadas por el modelo MSF.

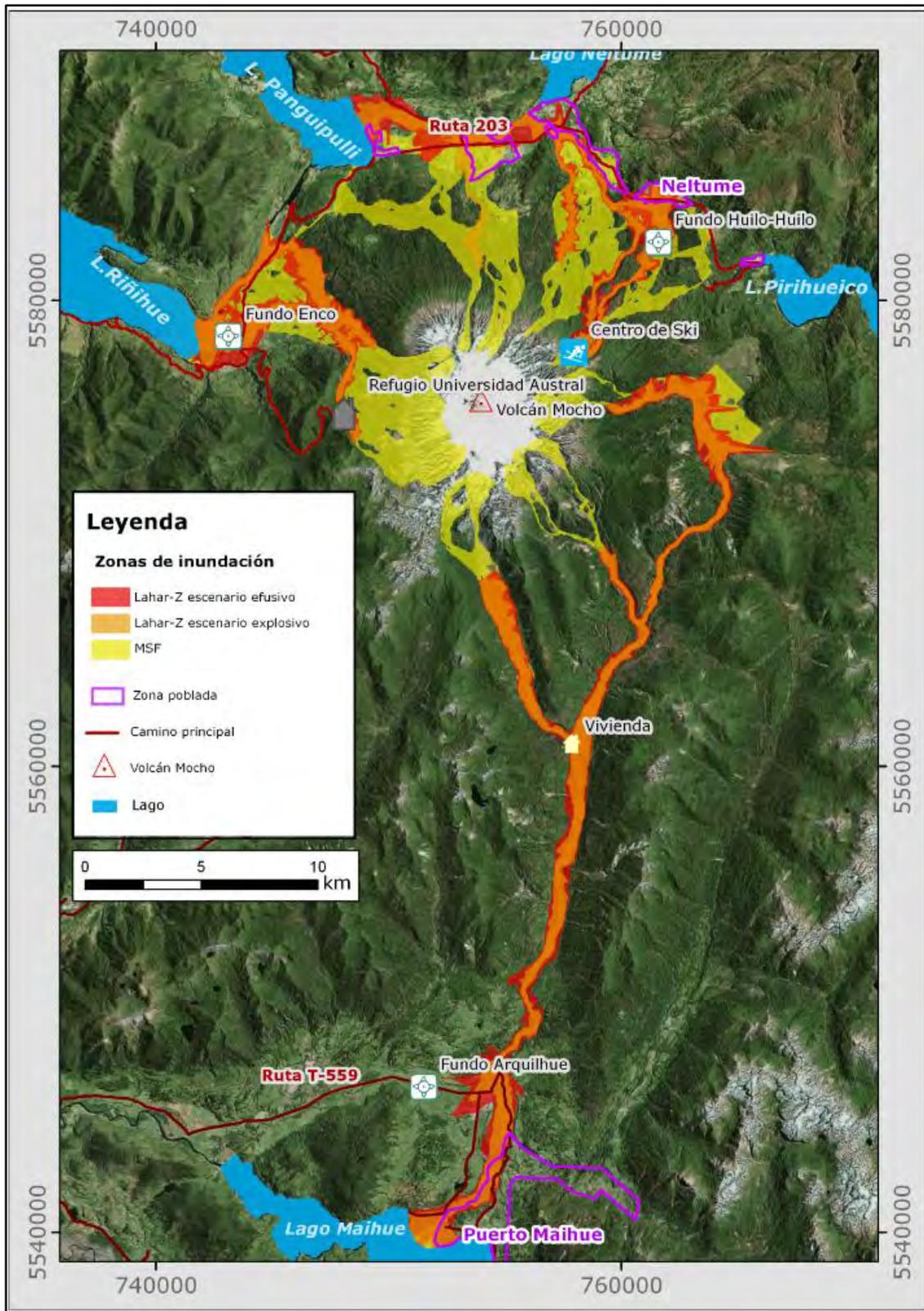


Fig. 3.5.13-A. Zonas de inundación previstas por modelo.

De la comparación de esta figura con el Mapa de Peligros del Complejo Volcánico Mocho-Choshuenco de Moreno y Naranjo (2006) se observa que en general los modelos LaharZ coinciden bastante bien con las zonas definidas por Moreno y Naranjo como de alto peligro por lahares (muy alto peligro en la zona de Enco), encontrándose las mayores diferencias en el sector de la quebrada Sin Nombre Noreste y de la pampa de Pilmaiquén, donde los modelos de este trabajo inundan más ampliamente que lo previsto por los autores indicados. Por otro lado los modelos generados con el software MSF **coinciden a "grosso modo" con las zonas de riesgo** medio del mapa de Moreno y Naranjo.

Por ello se decidió definir tres zonas de peligro: (1) Zona con alto peligro de ser inundadas por lahares en una erupción explosiva como las ocurridas en el volcán durante los últimos 2000 años (correspondiente al escenario 3 del modelo LaharZ). (2) Zona con alto peligro de ser inundadas por lahares en una erupción efusiva con tasa de emisión de lavas elevada (escenario 4 LaharZ) y (3) zonas con riesgo moderado de ser inundadas por lahares que correspondería a las zonas inundadas por el modelo MSF que no han sido inundadas por los modelos LaharZ. A esta división según modelos se le hizo una revisión crítica que cambió la categoría en algunos sectores.

En las Figs. 3.5.13-B y C se muestran el mapa de peligros por lahares definido para el volcán Mocho-Choshuenco en este trabajo.

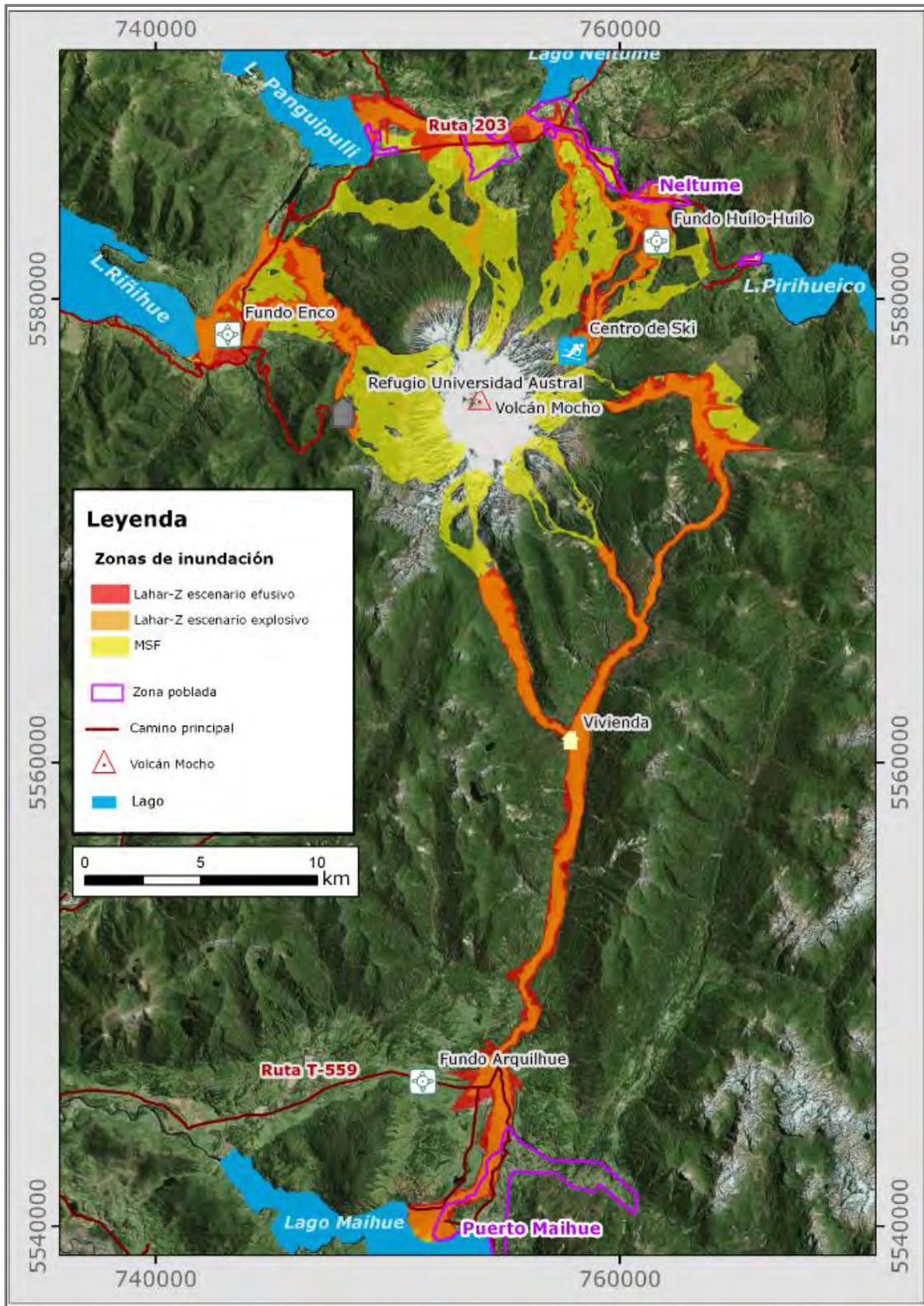


Fig. 3.5.13-A. Zonas de inundación previstas por modelo.

De la comparación de esta figura con el Mapa de Peligros del Complejo Volcánico Mocho-Choshuenco de Moreno y Naranjo (2006) se observa que en general los modelos LaharZ coinciden bastante bien con las zonas definidas por Moreno y Naranjo como de alto peligro por lahares (muy alto peligro en la zona de Enco), encontrándose las mayores diferencias en el sector de la quebrada Sin Nombre Noreste y de la pampa de Pilmaiquén, donde los modelos de este trabajo inundan más ampliamente que lo previsto por los autores indicados. Por otro lado los modelos generados con el software MSF **coinciden a "grosso modo" con las zonas de riesgo medio del mapa de Moreno y Naranjo.**

Por ello se decidió definir tres zonas de peligro: (1) Zona con alto peligro de ser inundadas por lahares en una erupción explosiva como las ocurridas en el volcán durante los últimos 2000 años (correspondiente al escenario 3 del modelo LaharZ). (2) Zona con alto peligro de ser inundadas por lahares en una erupción efusiva con tasa de emisión de lavas elevada (escenario 4 LaharZ) y (3) zonas con riesgo moderado de ser inundadas por lahares que correspondería a las zonas inundadas por el modelo MSF que no han sido inundadas por los modelos LaharZ. A esta división según modelos se le hizo una revisión crítica que cambió la categoría en algunos sectores.

En las Figs. 3.5.13-B y C se muestran el mapa de peligros por lahares definido para el volcán Mocho-Choshuenco en este trabajo.

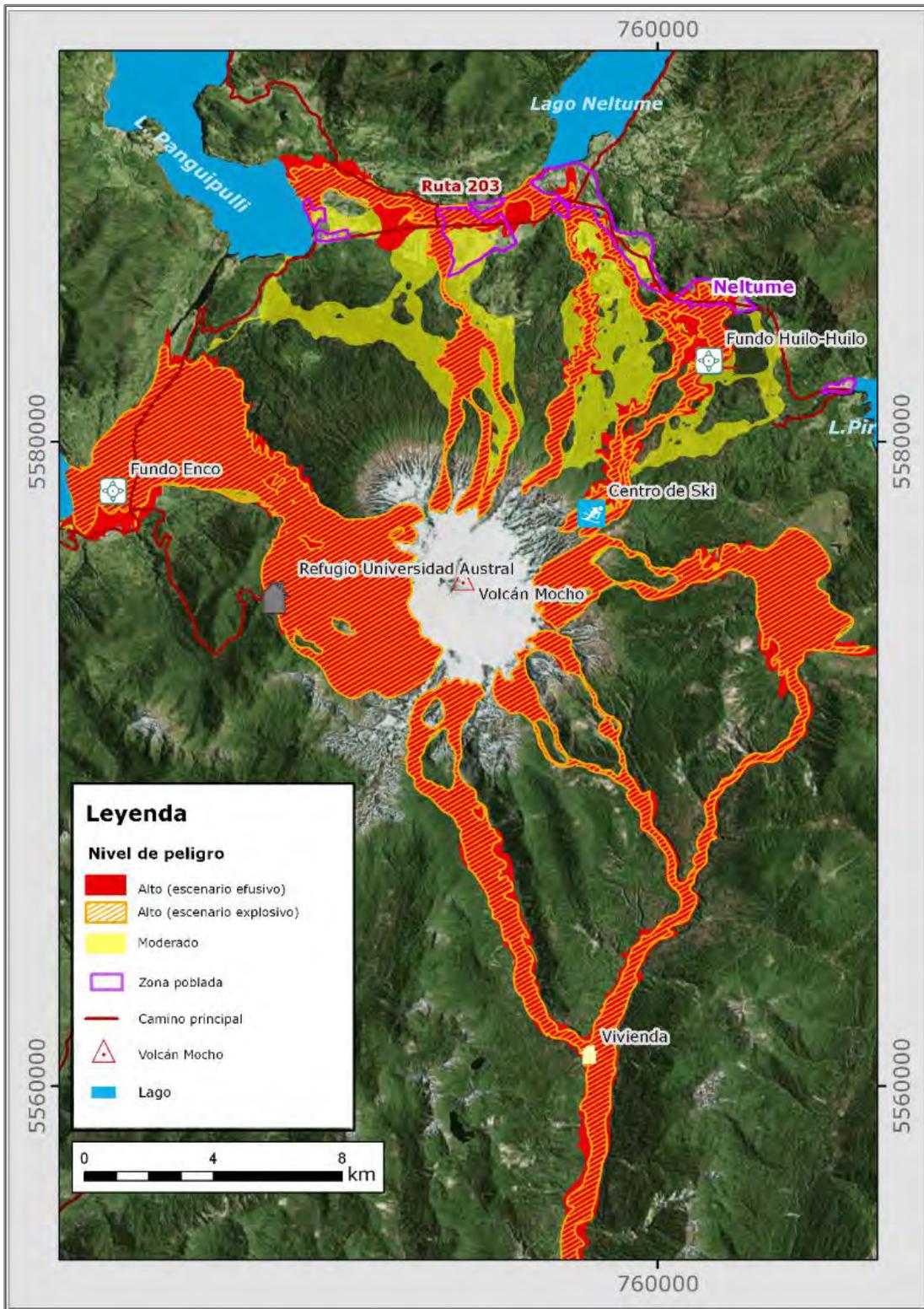


Fig. 3.5.13-B. Mapa de peligros por lahares del volcán Mocho-Choshuenco (sector complejo volcánico).

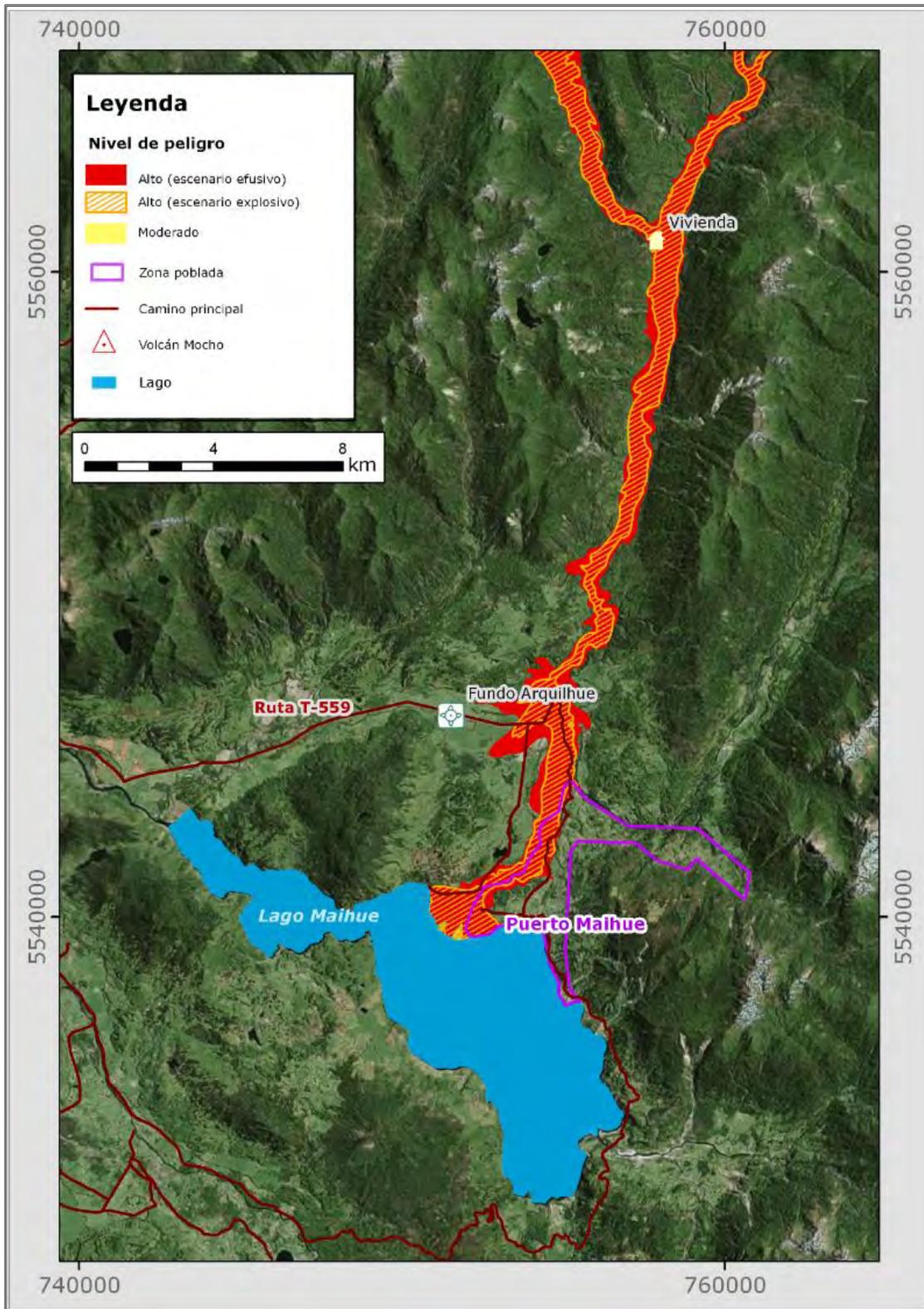


Fig. 3.5.13-C. Mapa de peligros por lahares del volcán Mocho-Choshuenco (sector Mahiue).

Dos son las diferencias con el mapa de Moreno y Naranjo que merecen ser remarcadas con especial atención. La primera corresponde al caso de la quebrada Sin Nombre Noreste ya que los modelos realizados en este trabajo indican que lahares que desciendan por esta quebrada afectarían a la zona de entrada a la reserva Huilo-Huilo y a la localidad de Neltume. Naranjo y Moreno la definen como de riesgo medio. Pensamos que la diferencia radica en el nacimiento de las cuencas del Triful, quebrada Sin Nombre Noreste y Blanco-Pillanleufú. Es necesario realizar un estudio de detalle de este sector para definir hacia que cuencas se dirige la escorrentía para determinar si todo el volumen estimado en este estudio para la cuenca Sin Nombre Noreste se encauzaría por la quebrada o en cambio se dirigiría hacia los ríos Triful y Blanco-Pillanleufú. En caso de que fuera así las áreas inundadas en Neltume y Huilo-Huilo serían menores y el riesgo también. No obstante, tal y como indican Moreno y Naranjo, siempre existe un riesgo importante ya que indudablemente parte de los flujos generados en ese sector bajarían por la quebrada, siendo su potencial amenaza función del volumen que capte.

La segunda diferencia importante se encuentra en el estero Punahue. En el sector medio de este estero el modelo MSF (tanto el modelo basado en el DEM topo como el modelo TIN) desvía parte del flujo hacia el Oeste, encaminándose hacia la zona de Enco, puerto Cancaguasi y a través del estero Chumpulli hacia Choshuenco. Inicialmente se atribuyó este fenómeno a un error del DEM y por ello se procedió a mejorar las curvas de nivel de la zona. Tras las mejoras introducidas ambos modelos continuaban mostrando el desvío por lo que se consideró como posible. Los modelos realizados con LaharZ muestran en ese punto varias secciones **que parecen indicar esa "fuga" de parte del flujo**. Esto se considera un punto importante ya que en función del volumen de lahar desviado podría haber afectación en la localidad de Choshuenco.

Remarcar que el mapa de Naranjo y Moreno no alcanza el sector de Arquihue y Maihue por lo cual no se pudo comparar en esos sector.

Teniendo en cuenta las áreas de inundación modeladas, la gradación del peligro indicada con anterioridad y la infraestructura presente en la zona se puede concluir que varias son las zonas que se encuentran en riesgo de ser afectadas por lahares. Haciendo un análisis de Oeste a Este y en sentido horario podemos concluir lo siguiente:

1. Sector Enco: Todo el sector agropecuario de Enco se encuentra en zona de

alto peligro para todos los escenarios modelados. En este sector los flujos no estarían limitados a los cauces y sus zonas aledañas sino que los abandonarían inundando amplios sectores. El camino de acceso al refugio de la Universidad Austral se vería seriamente afectado a su paso por este sector. En la parte alta tanto el refugio como las instalaciones de CONAF se verían afectadas. Es de remarcar que todos los volúmenes simulados llegan al lago Riñihue por lo que habría que ver como esto afecta al volumen del lago y a la ocurrencia de oleajes algo fuertes.

2. Sector Norte: en este sector se incluyen todas las áreas inundadas por la quebrada Sin Nombre Noreste, el río Triful, la quebrada Sin Nombre Norte y el estero Punahue. Comenzando el análisis desde el Este hacia el Oeste, el primer punto de interés corresponde al centro de Ski de Huilo-Huilo donde las instalaciones podrían verse afectadas. En la zona de entrada de Huilo-Huilo se verían afectadas las instalaciones de la entrada y varios derrames que pueden afectar de manera importante a Neltume, quedando todo este sector como de riesgo elevado. En este sector también se detecta un posible desvío hacia el estero Llallarca que ha sido marcado como de riesgo moderado.

Después de la unión entre el río Triful y el Fu, este recibe por su margen izquierda la quebrada Sin Nombre Norte. La confluencia de la quebrada con el río Fui es un punto de alto riesgo ya que afectaría a las viviendas de la zona y a la ruta internacional 203, que en este punto cruza ambos cauces. Inmediatamente después de este punto se observa un desborde por la margen izquierda que afectaría a los campos del sector. Una vez en el cauce del río Llanquihue, los volúmenes mayores desbordan por el margen izquierdo repetidas veces, afectando a las viviendas y explotaciones agropecuarias existentes en la zona, así como a la carretera y a algunos sectores del aeródromo de Choshuenco. La mayoría de los volúmenes modelados alcanzan el lago Panguipulli por lo cual podrían afectar al nivel del lago o provocar oleajes algo fuertes.

En este tramo, el río Llanquihue recibe las aguas del estero Punahue que muestra desbordes en la zona del abanico aluvial formado por el mismo

estero a su arribada al llano. Estos desbordes afectarían a las viviendas situadas en este sector por lo cual se ha definido como de alto riesgo.

Algunos de los desbordes del río Llanquihue y/o del estero Punahue podrían encauzarse por el estero Chumpulli, afectando a Choshuenco. Aunque se considera que esto puede ocurrir se le asigna una probabilidad menor por lo que se define como zona de riesgo medio.

3. Sector río Blanco-Pillanleufú: Las cuencas que drenan hacia el Este y el Sudeste (ríos Blanco-Pillanleufú, Chicho y Mocho) conforman este sector, siendo todos afluentes del río Blanco-Pillanleufú que desemboca en el lago Maihue al oeste de Puerto Maihue. Cuatro son los puntos con riesgo alto en este sector: la vivienda situada en la confluencia del río Chico con el Blanco-Pillanleufú, la zona agropecuaria de Arquihue, las casas de Puerto Maihue situadas en las terrazas más bajas del río (cerca de la confluencia con el río Curringue) y varias viviendas situadas en la desembocadura. Al igual que el resto de lagos, los lahares que llegan al Maihue afectarían a su volumen y podrían provocar oleajes algo fuertes.

4. ZONA GLACIOLÓGICA AUSTRAL

4.1. INTRODUCCIÓN

La zona glaciológica austral estudiada en este proyecto corresponde a los Campos de Hielo Patagónicos Norte y Sur (CHPN y CHPS respectivamente), donde se han seleccionado los glaciares Exploradores y Tyndall monitoreados por la DGA a partir de 2009.

El glaciar Exploradores se ubica en el extremo norte de CHPN y corresponde a un glaciar temperado que fluye hacia el norte. Tenía un área de 95 km² el año 2001, de los cuales 15 km² de su zona cercana al frente están cubiertos por detritos (Rivera et al., 2007). Este glaciar ha experimentado un fuerte retroceso y adelgazamiento en las últimas décadas. En el periodo 1979-2001 se registró un retroceso de 3,2 km (Aniya, 2001), mientras que el adelgazamiento promedio en la zona de ablación alcanzó $0,86 \pm 0,24$ m/a en el periodo 1975-2000 (Rignot et al., 2003). Las velocidades anuales de flujo hasta una distancia de 5 km del frente del glaciar alcanzaron valores de 48-138 m en el periodo 2003-2004 (Aniya et al., 2007). Se han realizado asimismo mediciones de balance energético y modelación del derretimiento (Konya & Matsumoto, 2010). La DGA ha realizado mediciones y monitoreo en el glaciar Exploradores desde el año 2009 (DGA, 2012). Cabe notar que la ablación puede alcanzar valores de hasta unos 12 m de hielo durante el periodo de verano. Los trabajos de terreno han cubierto el sector inferior de la zona de ablación, a una distancia menor a 5 km del frente del glaciar por lo general.

El glaciar Tyndall se ubica en el extremo suroriental de CHPS y fluye hacia el sur terminando en un lago proglacial. El glaciar Tyndall tenía un área de 315 km² el año 2000 (Casassa et al., en prensa) y ha retrocedido 3,5 km en el periodo 1944-1986 (Aniya et al., 1997), y 1,2 km en el periodo 1986-2000 (Casassa et al., en prensa). El adelgazamiento promedio en la zona de ablación alcanzó $1,80 \pm 0,21$ m/a en el periodo 1975-2000 (Rignot et al., 2003). A partir de datos de altimetría con un barredor láser aerotransportado, Keller et al. (2007) determinaron para el periodo 1975-2001 un adelgazamiento promedio de $3,1 \pm 1,0$ m/a para el área de ablación, con un máximo de $7,7 \pm 1,0$ m/a en el frente a 50 m de cota, y valores mínimos de 1,0 a $2,0 \pm 1,0$ m/a a cotas cercanas a la línea de equilibrio (900 m). La mayor parte de las mediciones **terrestres se ha concentrado en la "transecta japonesa"** (Figs. 5 y 6), establecida el año

1985 (Naruse et al., 1987) en un sector medio del glaciar a una cota promedio de 600 m, con una aproximación desde el margen oriental conocido como lóbulo Zapata. La DGA ha realizado mediciones y monitoreo en el glaciar Tyndall desde el año 2009 (DGA, 2012).

4.2. GLACIAR EXPLORADORES

4.2.1. Trabajos de terreno

Se efectuaron tres campañas a la zona de ablación del glaciar Exploradores, al igual que en los glaciares de la zona central. Durante la primera campaña, entre el 13 y 17 de abril, la primera campaña se instaló y controló con DGPS una red de balizas de ablación y se recuperaron los datos de la estación meteorológica instalada en el lugar. En la segunda campaña, al final del verano, se controlaron nuevamente con DGPS las balizas instaladas. En la tercera campaña, la primavera siguiente a principios de noviembre, se reinstaló y controló la red de balizas, y se implementó el sistema de transmisión satelital a la estación meteorológica automática instalada en el lugar por personal de la Unidad de Glaciología y Nieves.

En general, estas campañas fueron realizadas por tres personas de nuestro equipo de trabajo, asistidas y acompañadas por una persona de la organización que controla el acceso al glaciar (www.elpuesto.cl). Para realizar los trabajos se accedió diariamente al glaciar desde un refugio instalado en las cercanías que cuenta con infraestructura para comer y dormir.

4.2.1.1. *Instalación y control de Balizas*

4.2.1.1.1 Campaña N°1

Se realizó la primera campaña de terreno el 13-17 de abril de 2013, instalando balizas de ablación aproximadamente en las ubicaciones propuestas en el plan de trabajo. En el terreno se observó la factibilidad técnica de instalación (Fig. 4.2.1.1.1-A) y se reubicaron algunas de las balizas cuidando de mantener en lo posible la distribución propuesta. Se perforó en hielo a una profundidad aproximada de 2 m para insertar las balizas, de manera de cuantificar la ablación en la campaña siguiente, que debía efectuarse 1 mes después.



Fig. 4.2.1.1.1-A. Instalación de balizas en terreno, glaciar Exploradores.

4.2.1.1.2 Campaña N°2

Con fecha 15 de mayo de 2013 se realizó una medición de las balizas instaladas en la primera campaña.



Fig. 4.2.1.1.2-A. Medición de balizas de ablación en el glaciar Exploradores.

Todas las balizas se encontraban sin presentar ninguna anomalía, salvo leve inclinación producto del derretimiento que se produce con el contacto del tubo de PVC. Esta situación no produce inconvenientes al momento de cuantificar la ablación en cada punto debido a la insignificante inclinación.

4.2.1.1.3 Campaña N°3

La 3ª campaña en el glaciar Exploradores tuvo como objetivo principal la reinstalación de la red de balizas para control durante la temporada 2013–2014. Las balizas se instalaron en perforaciones de 10 m de profundidad realizadas con taladro a vapor. Las balizas fueron fabricadas con PVC naranja, de 7 secciones de 1,5 m c/u. unidas entre sus extremos con cordón de 3 mm. Todas las balizas quedaron correctamente instaladas, sobresaliendo 0,5 m sobre la superficie del hielo.



Fig. 4.2.1.1.3-A. Perforación con taladro a vapor e instalación de balizas de PVC en el glaciar Exploradores.

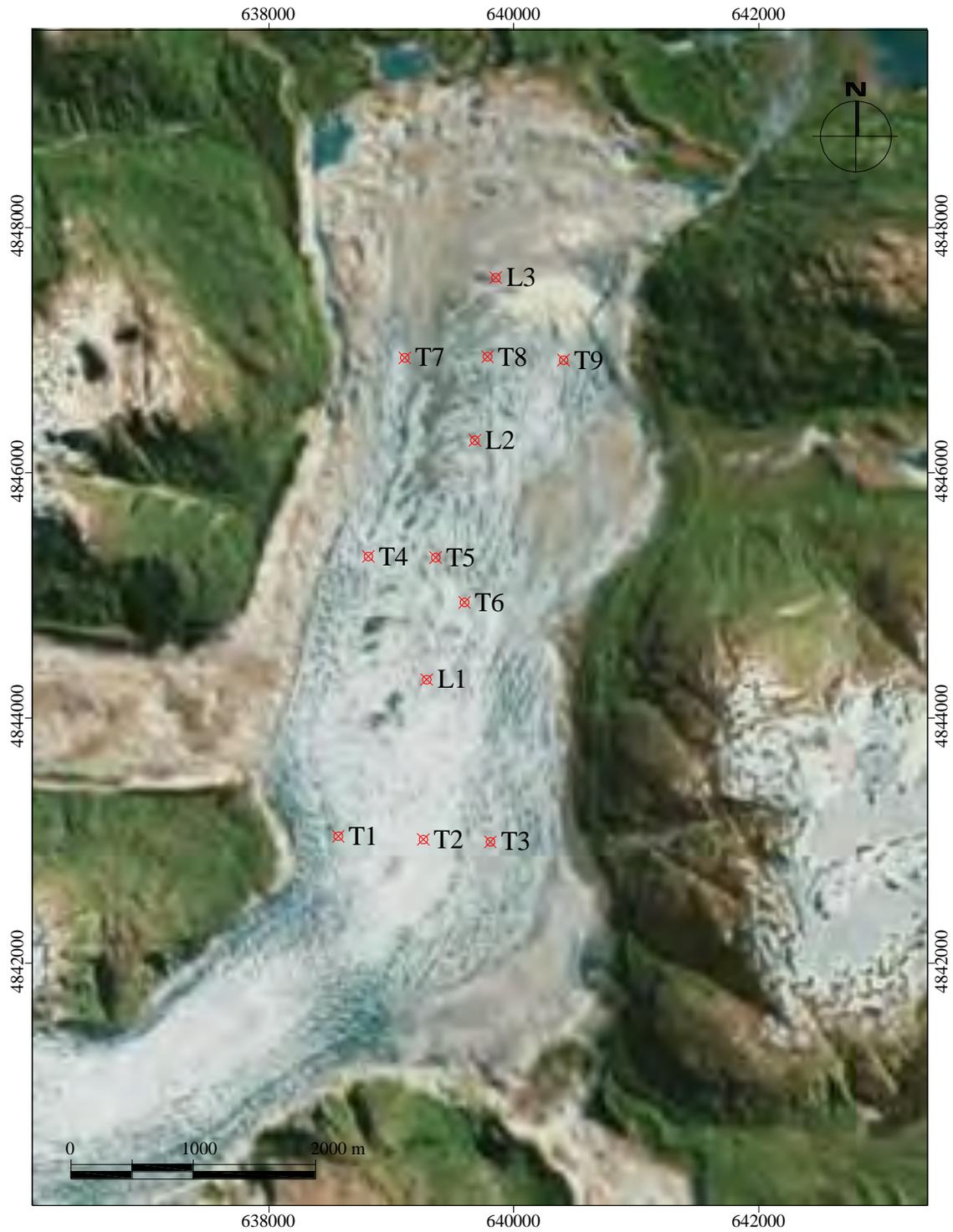


Fig. 4.2.1.1.3-B. Ubicación de las balizas instaladas el mes de octubre de 2013 en el glaciar Exploradores. Fuente de imagen Bing Maps.

Tabla 4.2.1.1.3-A. Fecha de instalación y medición de las balizas en el glaciar Exploradores.

Glaciar	Baliza	Fecha	Largo baliza (cm)	Baliza fuera del hielo (cm)
Exploradores	L1	31-10-2013	1.050	50
Exploradores	L2	31-10-2013	1.050	50
Exploradores	L3	29-10-2013	1.050	50
Exploradores	T1	31-10-2013	1.050	50
Exploradores	T2	31-10-2013	1.050	50
Exploradores	T3	31-10-2013	1.050	50
Exploradores	T4	31-10-2013	1.050	50
Exploradores	T5	31-10-2013	1.050	50
Exploradores	T6	31-10-2013	1.050	50
Exploradores	T7	29-10-2013	1.050	50
Exploradores	T8	29-10-2013	1.050	50
Exploradores	T9	29-10-2013	1.050	50

4.2.1.2. **Mediciones DGPS**

4.2.1.2.1 Campaña N°1

Para realizar las mediciones estáticas y cinemáticas sobre el glaciar Exploradores, se implementó una estación base ubicada en una gran roca sobre la morrena frontal (ver Fig. 4.2.1.2.1-A.). Para calcular la estación base implementada para controlar el glaciar Exploradores (BEXP) se utilizaron las observaciones del día 15 de abril de 2013 de las estaciones base permanentes PARC ubicada en Punta Arenas y RIO2 de Rio Grande (Argentina) y la sesión de 8 horas de medición estática de la estación BEXP. Las líneas base entre RIO2-BTDL. PARC-BTDL tienen una longitud de 897 y 756 km respectivamente, las precisiones alcanzadas fueron del orden de 0.078 m en la horizontal y 0,079 m en la vertical.

Las coordenadas de la estación base implementada para controlar el glaciar Exploradores (BEXP) se muestran en la Tabla 4.2.1.2.1-A.



Fig. 4.2.1.2.1-A. Base GNSS (BEXP) instalada sobre un afloramiento rocoso en el margen frontal del glaciar Exploradores.

Tabla 4.2.1.2.1-A. Coordenadas estación base glaciar Exploradores.

COORDENADAS WGS84 PUNTO BASE BEXP			
Este	641233.835 m	Latitud	S46°29'57.72330"
Norte	4848821.105 m	Longitud	W73°09'33.80613"
Elevacion	225.194 m	Altura	246.365 m

El post proceso de coordenadas de las balizas y el levantamiento cinemático se realizó. al igual que con la base, utilizando el software TBC. Los resultados obtenidos presentaron precisiones no mayores a los 0,04 cm en horizontal y vertical en las sesiones estáticas y sub decimétrica en cinemático.

Las coordenadas obtenidas, la distribución de las balizas y el levantamiento cinemático se muestran en la Tabla 4.2.1.2.1-A y la Fig. 4.2.1.2.1-B respectivamente.

Tabla.4.2.1.2.1-B. Coordenadas de las balizas sobre el glaciar Exploradores. al momento de su instalación. Coordenadas expresadas en proyección UTM huso 18 sur, sistema geodésico WGS84, altura elipsoidal (m) y altura ortométrica (m s.n.m) según el modelo geoidal EGM06.

Baliza	UTM E (m)	UTM N (m)	Altura elipsoidal (m)	Altura ortométrica (m s.n.m.)
L1	639.302,09	4.844.312,87	203,84	224,80
L2	639.681,24	4.846.269,92	181,24	202,27
L3	639.851,20	4.847.591,95	168,12	189,18
T1	638.567,46	4.843.037,02	235,84	256,74
T2	639.261,99	4.843.008,46	249,60	270,53
T3	639.810,80	4.842.975,37	241,64	262,60
T4	638.812,89	4.845.312,08	201,59	222,55
T5	639.355,13	4.845.234,12	196,52	217,51
T6	639.731,13	4.845.187,82	186,60	207,60
T7	639.112,26	4.846.933,95	181,41	202,42
T8	639.788,74	4.846.944,35	174,44	195,49
T9	640.406,98	4.846.915,95	178,92	200,00

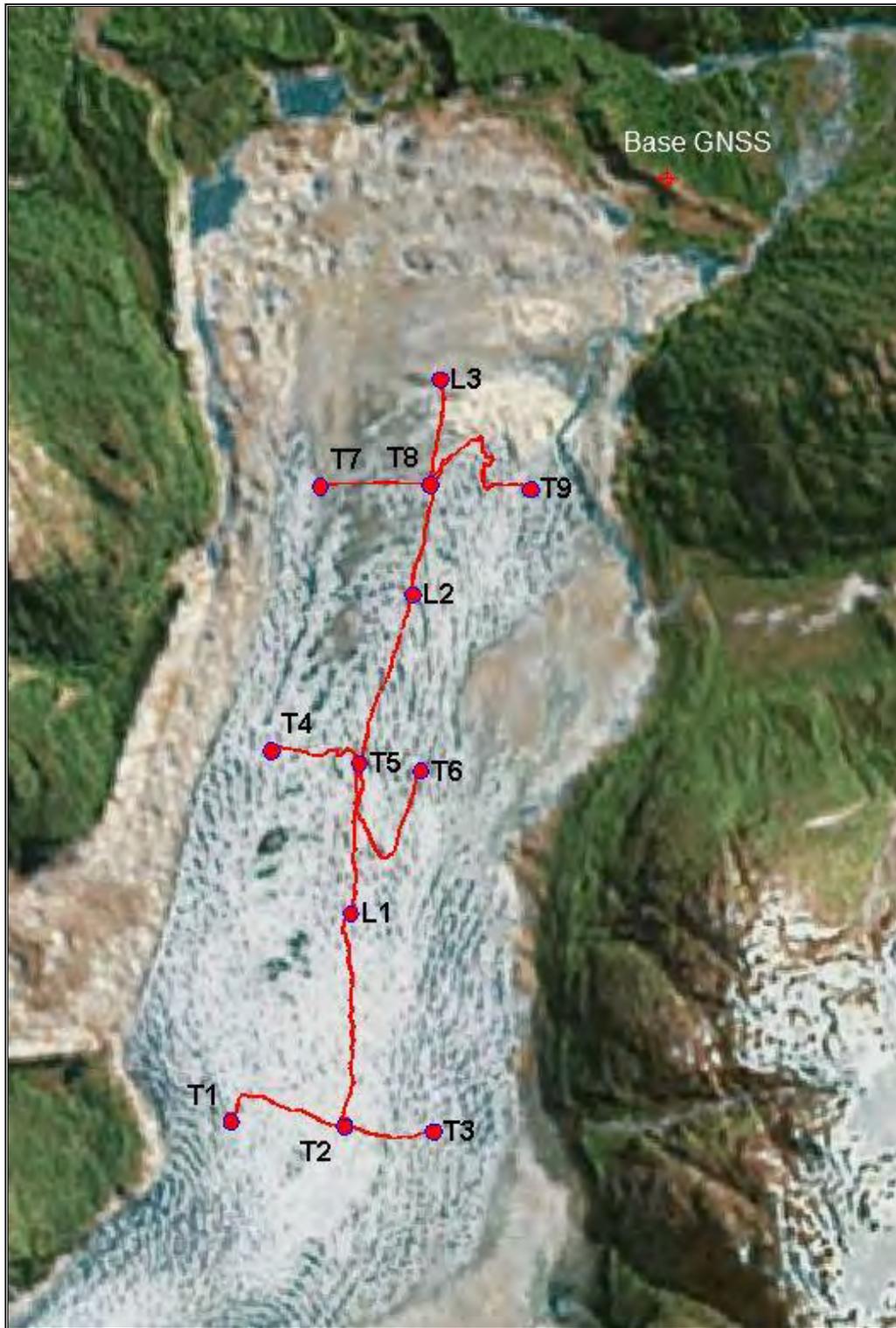


Fig. 4.2.1.2.1-B. Ubicación de las balizas y recorridos cinemáticos sobre el glaciar Exploradores.

4.2.1.2.2 Campaña N°2

El 15 de mayo de 2013 se realizó la 2ª campaña de mediciones glaciológicas y GNSS en el glaciar Exploradores (Fig. 4.2.1.2.2-A), que consistió en medir en modo estático cada una de las 12 balizas instaladas en la campaña N°1. La base utilizada fue la implementada en la campaña anterior (BEXP). Las coordenadas obtenidas en este control se muestran en Tabla 4.2.1.2.2-A.



Fig. 4.2.1.2.2-A. Vista del área de hielo descubierto en la zona de ablación en el glaciar Exploradores.

Tabla.4.2.1.2.2-A. Coordenadas de las balizas sobre el glaciar Exploradores, al momento del segundo control. Coordenadas expresadas en proyección UTM huso 18 sur, sistema geodésico WGS84, altura elipsoidal (m) y altura ortométrica (m s.n.m.) según el modelo geoidal EGM06.

Balizas	UTM E (m)	UTM N (m)	Altura elipsoidal (m)	Altura ortométrica (m s.n.m.)
L1	639.302,91	4.844.325,53	204,10	225,07
L2	639.685,54	4.846.278,90	184,03	205,06
L3	639.853,32	4.847.598,17	170,59	191,65
T1	638.565,63	4.843.055,06	233,71	254,61
T2	639.265,07	4.843.028,92	248,12	269,06
T3	639.814,22	4.842.985,41	241,11	262,07
T4	638.815,39	4.845.324,21	202,70	223,65
T5	639.359,10	4.845.245,80	198,75	219,73
T6	639.736,79	4.845.197,41	189,27	210,28
T7	639.113,92	4.846.942,45	183,58	204,59
T8	639.791,90	4.846.951,98	176,94	197,98
T9	640.410,57	4.846.922,44	180,75	201,83

4.2.1.2.3 Campaña N°3

La tercera campaña de mediciones DGPS en el glaciar Exploradores se, realizo entre los días 29 y 31 de octubre de 2013. En forma paralela a la instalación de las balizas se realizó la medición DGPS en modo estático en cada una de las 12 balizas instaladas. Ver Fig. 4.3.1.2.3-A.



Fig. 4.2.1.2.3-A. DGPS móvil midiendo en modo estático en la perforación de una de las balizas del glaciar Exploradores.

La distribución final de las balizas instaladas en el glaciar Exploradores se puede observar en la Fig. 4.2.1.2.3.-B. y las coordenadas resultantes luego del proceso se muestran en la Tabla 4.2.1.2.3-A.

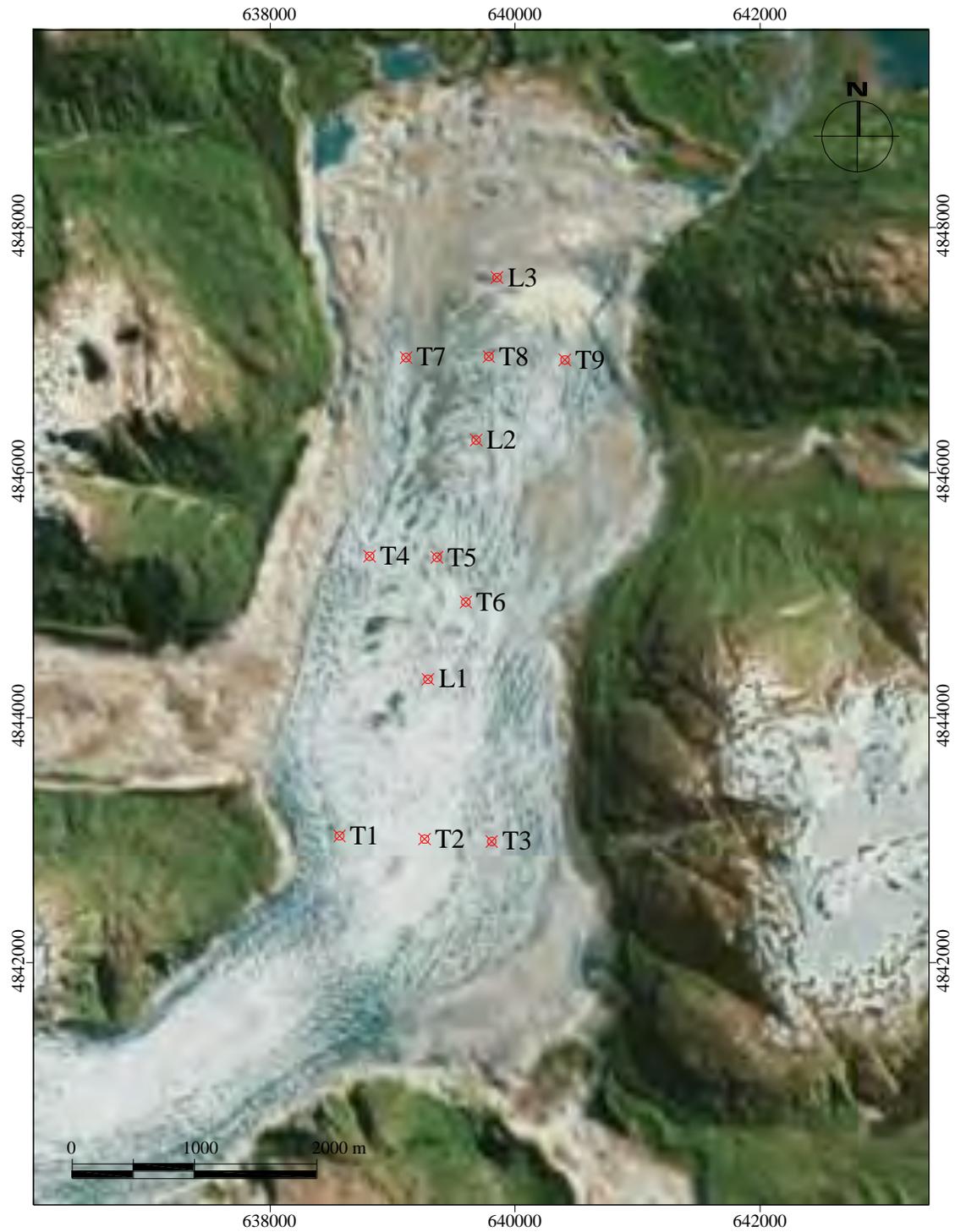


Fig. 4.2.1.2.3-B. Ubicación de las balizas instaladas el mes de octubre de 2013 en el glaciar Exploradores. Fuente de imagen Bing Maps.

Tabla 4.2.1.2.3-A. Ubicación de la balizas en el glaciar Exploradores. instaladas en el mes de octubre de 2013. Coordenadas expresadas en proyección UTM huso 18 sur. sistema geodésico WGS84, altura elipsoidal (m) y altura ortométrica (m s.n.m) según el modelo geoidal EGM06.

Baliza	UTM E (m)	UTM N (m)	Altura elipsoidal (m)	Altura ortométrica (m s.n.m.)
L1	639.289,14	4.844.312,90	208,86	229,82
L2	639.681,20	4.846.265,91	184,84	205,87
L3	639.852,91	4.847.592,72	171,72	192,78
T1	638.567,53	4.843.034,85	237,24	258,14
T2	639.262,49	4.843.008,00	247,12	268,05
T3	639.808,97	4.842.988,92	241,90	262,86
T4	638.813,03	4.845.317,09	204,38	225,34
T5	639.362,60	4.845.308,69	200,10	221,09
T6	639.598,07	4.844.942,41	193,83	214,82
T7	639.110,24	4.846.939,66	185,27	206,27
T8	639.785,80	4.846.948,35	179,46	200,51
T9	640.407,51	4.846.920,10	180,91	201,99

4.2.2. Estación meteorológica y transmisión Iridium

4.2.2.1. Campaña N°1

Durante la primera campaña se respaldaron datos de la AWS GEUS del glaciar Exploradores. Al verificar los datos bajados desde la estación se pudo detectar que existe un registro erróneo del promedio de la temperatura y la humedad relativa, y los datos del sensor de altura de la superficie indicaban valor cero.

4.2.2.2. Campaña N°2

En la campaña de mayo al glaciar Exploradores, se realizó una visita a la AWS GEUS instalada en el glaciar (Fig. 4.2.2.2-A). Ésta se encontraba funcionando normalmente en posición vertical con sus sensores orientados correctamente. Se procedió a respaldar los datos guardados en el data logger de la estación, tarea que se completó sin inconvenientes. Sin embargo, al verificar los datos en gabinete se pudo detectar que existe un registro erróneo del promedio de la temperatura y la humedad relativa, y los datos del sensor de altura de la superficie indicaban valor cero.



Fig. 4.2.2.2-A. AWS GEUS en el glaciar Exploradores. Mayo de 2013.

4.2.2.3. ***Campaña N°3***

Durante la campaña N°3 se accedió a la estación meteorológica para realizar un control rutinario e implementar el sistema de transmisión de datos Iridium. Se chequeó y corrigió la posición de la estación, se respaldaron los datos guardados y se instaló el nuevo programa y conectó el modem Iridium, después de esto comenzó automáticamente a enviar datos. En el periodo entre las campañas 2 y 3 personal de la UGN de la DGA procedió a instalar un nuevo sensor de humedad relativa y temperatura y un sensor de altura de nieve.



Fig. 4.2.2.3-A. En el centro de la figura se puede identificar la antena del sistema de transmisión Iridium instalada sobre el brazo de la estación meteorológica GEUS.

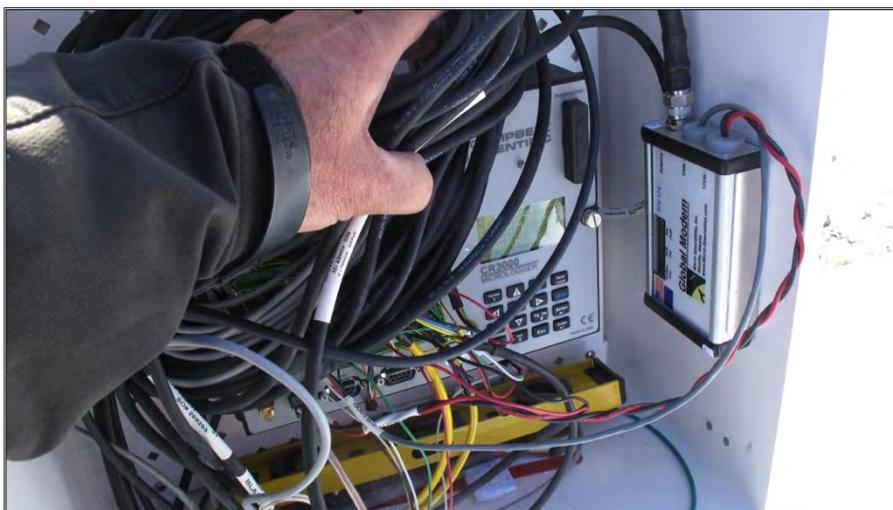


Fig. 4.2.2.3-B. En el costado derecho de la imagen, adosado a la pared interior derecha de la caja data-logger se puede apreciar el modem "Global Modem".

4.2.3. Velocidad de movimiento

Para determinar la velocidad superficial se calculó la diferencia entre las coordenadas de las balizas entre la primera (abril) y la segunda campaña (mayo), que permite determinar

su velocidad de flujo y dirección del desplazamiento. Las velocidades calculadas varían entre 44,03 cm/día y 13,99 cm/día, con un promedio de 26,89 cm/día, ver Tabla 4.2.3-A.

Tabla. 4.2.3-A. Coordenadas y velocidades de movimiento de las balizas sobre el glaciar Exploradores. Coordenadas expresadas en proyección UTM huso 18 sur. sistema geodésico WGS84. El azimut está referido al norte geográfico.

Balizas glaciar Exploradores segunda medición mayo 2013					
BALIZA	FECHA	COORDENADAS UTM		VELOCIDAD	AZIMUT
		UTM E (m)	UTM N (m)	cm/día	grado sexagesimal
L1	15-05-2013	639.302,91	4.844.325,53	42,30	4
L2	15-05-2013	639.685,54	4.846.278,90	33,19	26
L3	15-05-2013	639.853,32	4.847.598,17	13,99	19
T1	15-05-2013	638.565,63	4.843.055,06	38,57	354
T2	15-05-2013	639.265,07	4.843.028,92	44,03	9
T3	15-05-2013	639.814,22	4.842.985,41	22,56	19
T4	15-05-2013	638.815,39	4.845.324,21	26,36	12
T5	15-05-2013	639.359,10	4.845.245,80	26,23	19
T6	15-05-2013	639.736,79	4.845.197,41	23,69	31
T7	15-05-2013	639.113,92	4.846.942,45	18,43	11
T8	15-05-2013	639.791,90	4.846.951,98	17,58	22
T9	15-05-2013	640.410,57	4.846.922,44	15,78	29

En la Fig. 4.2.3-A se presentan las velocidades calculadas para el glaciar Exploradores. Se observa que las mayores velocidades ocurren en la zona alta estudiada del glaciar. Hacia el frente las velocidades muestran una desaceleración típica del régimen compresivo de una zona de ablación en ausencia de un rol relevante de un frente desprendente en agua.

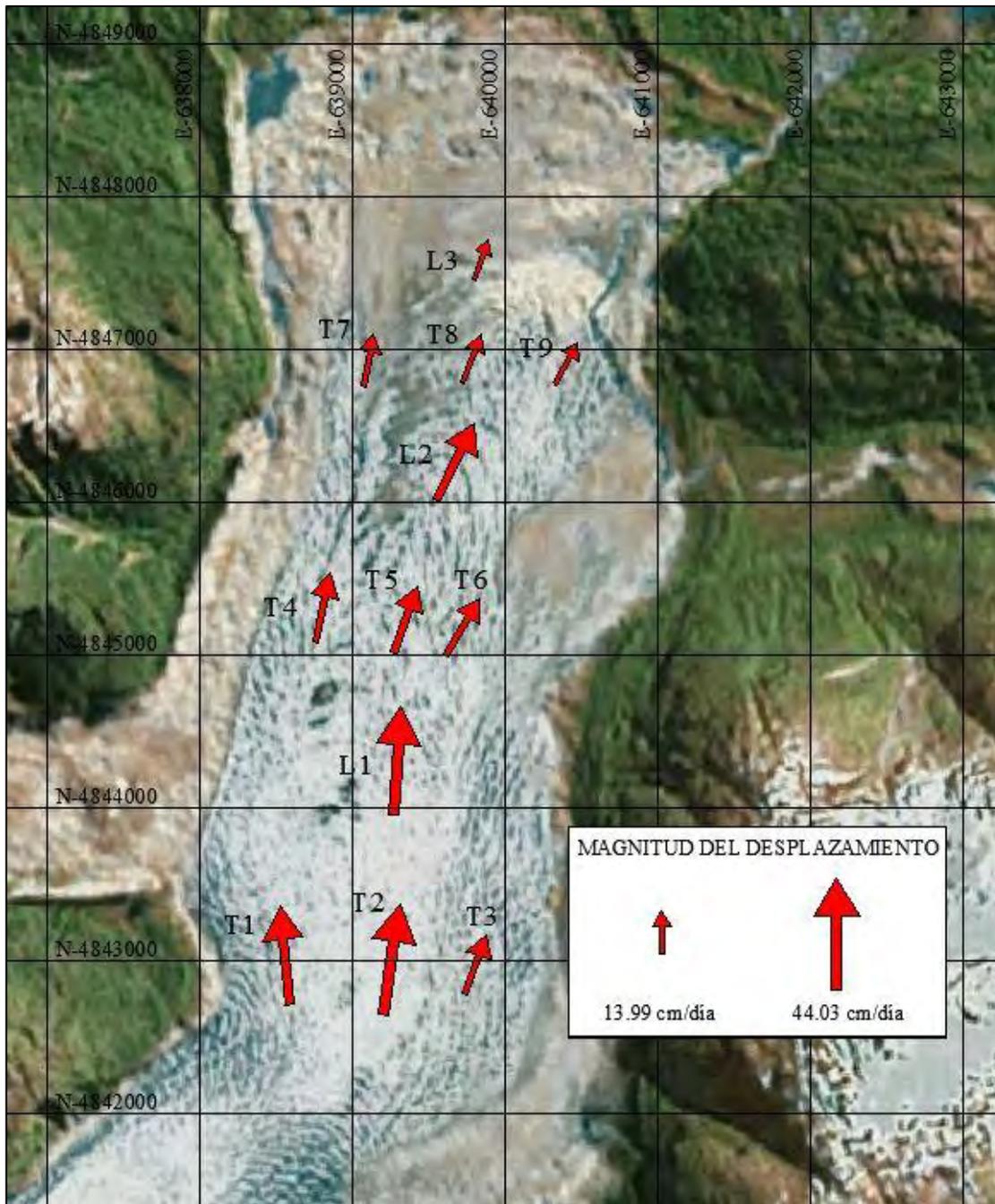


Fig. 4.2.3-A. Vectores de velocidad medidos en la superficie del glaciar Exploradores. entre Abril de 2013 y Mayo 2013. Fuente de la imagen: Google Earth.

4.2.4. Meteorología

Para la caracterización meteorológica del glaciar Exploradores se utilizó una estación tipo GEUS de la red de glaciares de la DGA con el objetivo de obtener información de detalle y determinar el balance de energía superficial (SEB).

La estación en el glaciar Exploradores se ubica en las coordenadas UTM 18G 639.506 E 4.847.135 S en la zona baja del glaciar, a una altitud de 187 m s.n.m. aproximadamente, ver Fig. 4.2.4-A. La imagen de la estación se presenta en la Fig. 4.2.4-B.

La estación en el glaciar Exploradores cuenta con los siguientes sensores:

- Radiación de onda corta incidente y reflejada
- Radiación de onda larga incidente y emitida
- Temperatura y humedad
- Presión atmosférica
- Temperatura aspirada
- Altura de la superficie
- Dirección y velocidad del viento.

De la estación Exploradores se obtuvieron dos periodos de datos, el primero desde el 5 de diciembre hasta el 15 de mayo del 2013 y el segundo desde el 27 de agosto del 2013 hasta el 28 de noviembre del mismo año.

La estación meteorológica Exploradores fue instalada por la DGA en el año 2012, y fue visitada y se descargaron los datos el 15 de abril, el 15 de mayo y el 29 de octubre de 2013. En la primera visita se identificó que la estación no estaba registrando la temperatura del aire, humedad relativa y altura de nieve. Esta situación se solucionó en la última visita de octubre, cuando se instaló un nuevo programa y se modificaron las conexiones de los sensores, después de lo cual todos los sensores quedaron funcionando correctamente. Además en esta misma visita se instaló el sistema de transmisión satelital de datos Iridium.

Los datos meteorológicos digitales se adjuntan en los Anexos Digitales.



Fig. 4.2.4-A. Ubicación de la estación meteorológica del Glaciar Exploradores.
Fuente de la imagen: Google Earth.

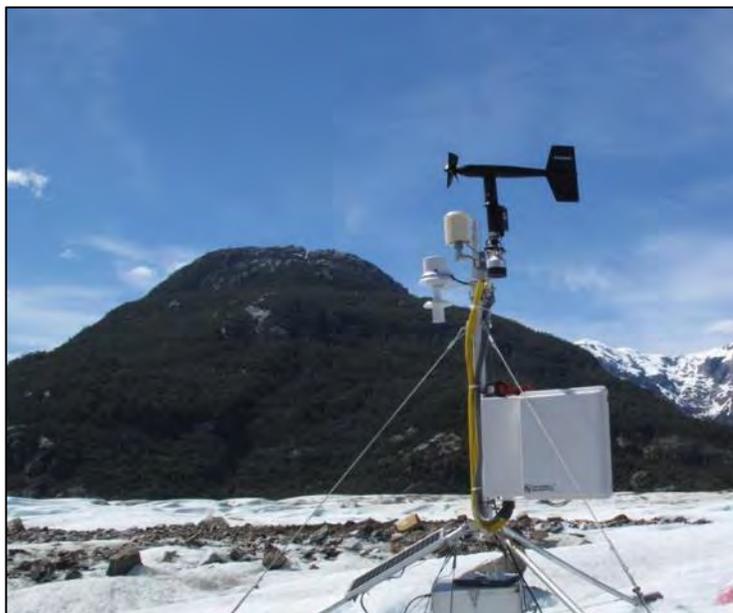


Fig. 4.2.4-B. Estación meteorológica en glaciar Exploradores.

4.2.4.1. **Temperatura del aire**

El sensor de temperatura del aire registró valores fuera de rango, por lo que solo se analizarán los valores de la temperatura aspirada en la estación Exploradores. La temperatura promedio en la estación para los dos periodos de registro de datos fue de +5,6 °C, con un máximo de 22,4 °C y un mínimo de -4,8 °C. En las Figs. 4.2.4.1-A y B se presentan los datos horarios de temperatura aspirada en la estación Exploradores, para ambos periodos de registro, respectivamente. En estas figuras se observa que la temperatura aspirada se mantiene positiva la mayor parte del tiempo, alcanzando los máximos valores en el mes de febrero.

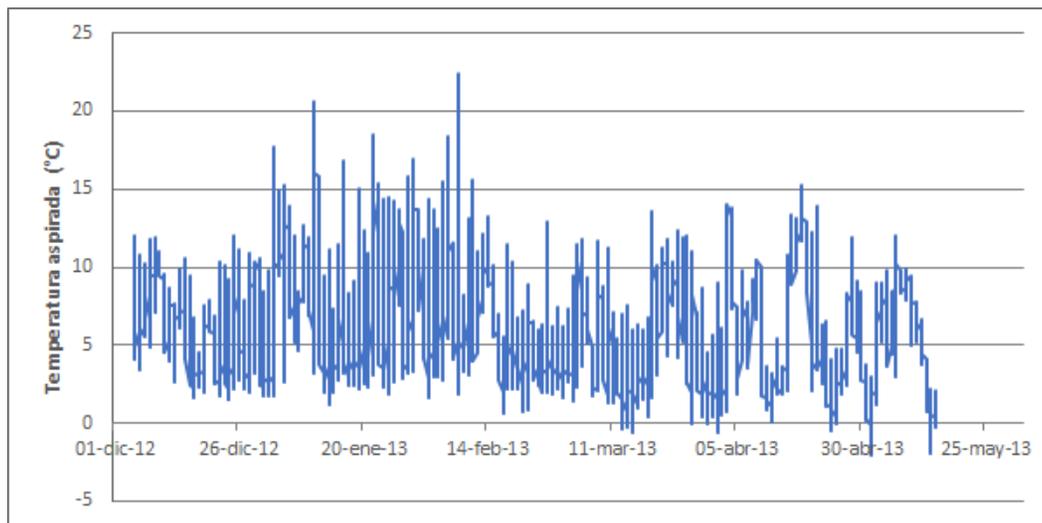


Fig. 4.2.4.1-A. Temperatura del aire aspirada promedio hora en la estación Exploradores. Primer periodo de registro.

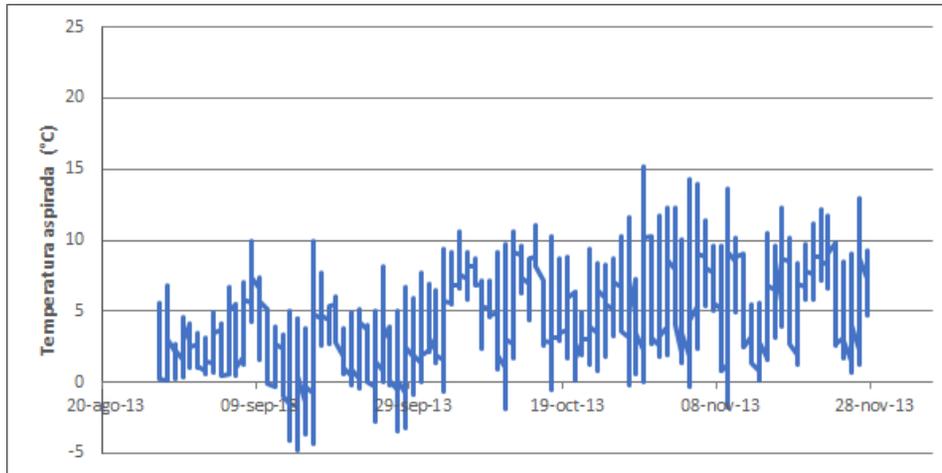


Fig. 4.2.4.1-B. Temperatura del aire aspirada promedio hora en la estación Exploradores. Segundo periodo de registro.

4.2.4.2. ***Humedad relativa***

El sensor de humedad relativa instalado en la estación Exploradores registró valores fuera de rango en todo el primer periodo de medición, por lo que los datos analizados se presentan únicamente para el periodo comprendido entre el 1 y 28 de noviembre del 2013.

La humedad relativa promedio en este periodo fue de 83%, con un máximo de 100% y un mínimo de 33%. En la Fig. 4.2.4.2-A se presentan los datos horarios de la humedad relativa en la estación Exploradores. Se observa que la humedad es muy alta en la zona, encontrándose la mayor parte del tiempo sobre el 60 %.

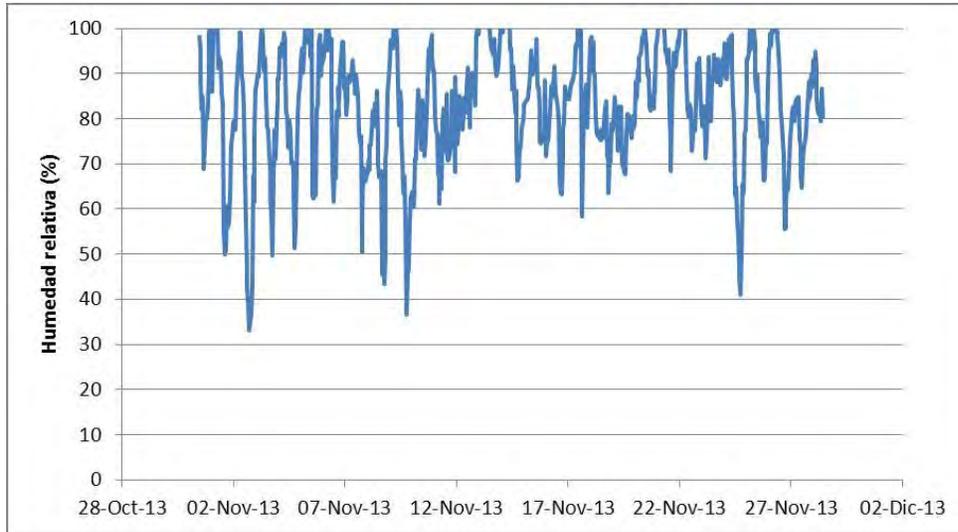


Fig. 4.2.4.2-A. Humedad relativa promedio hora en la estación Exploradores.

4.2.4.3. ***Presión atmosférica***

La presión atmosférica promedio registrada en el glaciar Exploradores fue de 992 mbar, con un máximo de 1.018 mbar y un mínimo de 866 mbar. En las figs. 4.2.4.3-A y B se presenta la presión atmosférica registrada en la estación Exploradores para los dos periodos de registro de valores.

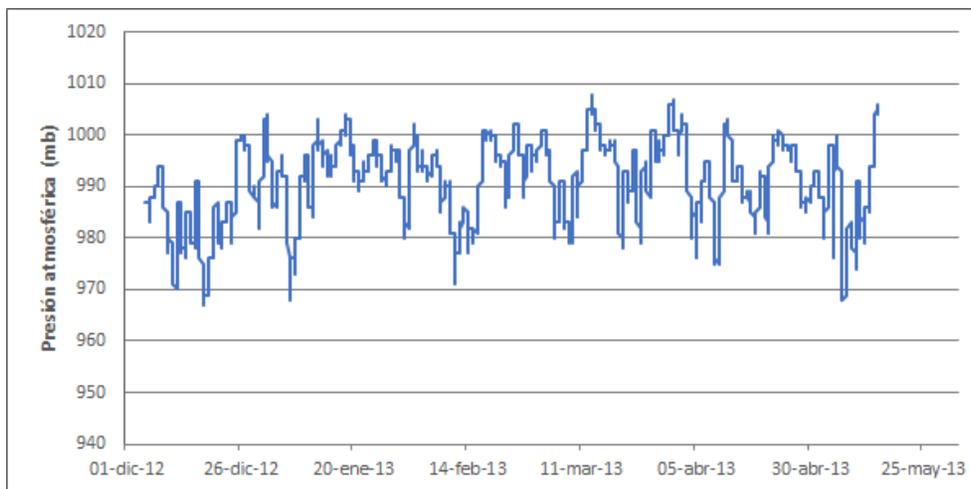


Fig. 4.2.4.3-A. Presión atmosférica promedio hora en la estación Exploradores. Primer periodo de registro.

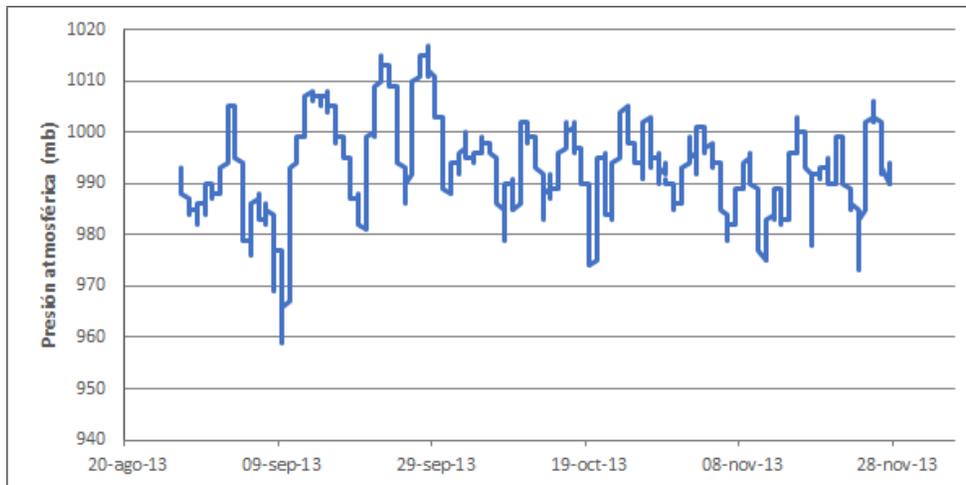


Fig. 4.2.4.3-B. Presión atmosférica promedio hora en la estación Exploradores. Segundo periodo de registro.

4.2.4.4. **Velocidad y dirección del viento**

La velocidad del viento promedio registrada en la estación Exploradores fue de 2,6 m/s. con una máxima de 13,1 m/s. En las Fig. 4.2.4.4-A y B se, presenta la velocidad del viento horaria registrada en la estación meteorológica Exploradores. Se observa que la velocidad del viento tiene un comportamiento similar durante todo el periodo registrado, con vientos débiles entre 0 y 2 m/s en condiciones estables y vientos fuertes entre 8 y 13 m/s en condiciones inestables.

En las Figs. 4.2.4.4-C D E y F se presenta la rosa de los vientos en la estación meteorológica Exploradores. Se observa que las direcciones principales son las sur y sur-este que corresponden a los vientos catabáticos que bajan y salen por el glaciar hacia el valle. La siguiente dirección importante es la nor-noroeste que corresponde a los vientos que suben por el glaciar.

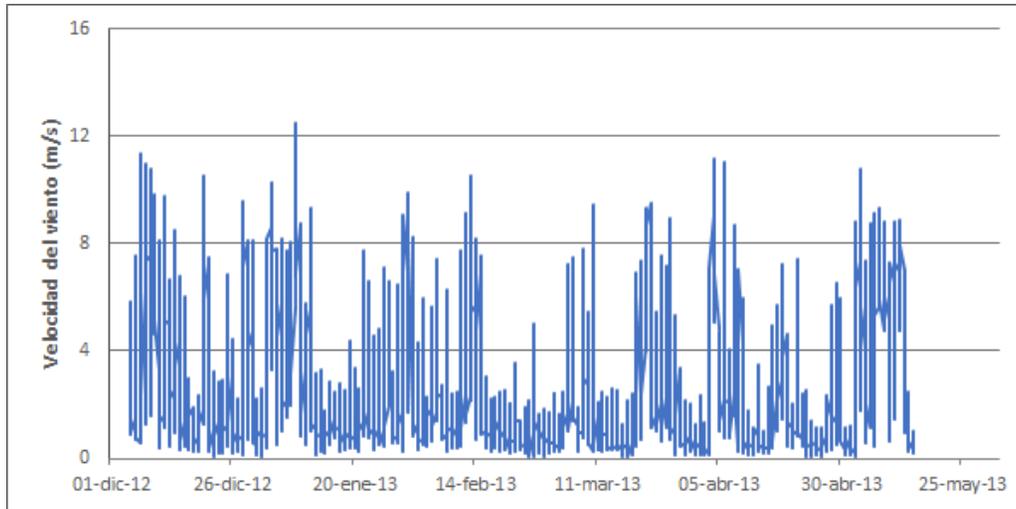


Fig. 4.2.4.4-A. Velocidad del viento promedio hora en la estación Exploradores. Primer periodo de registro.

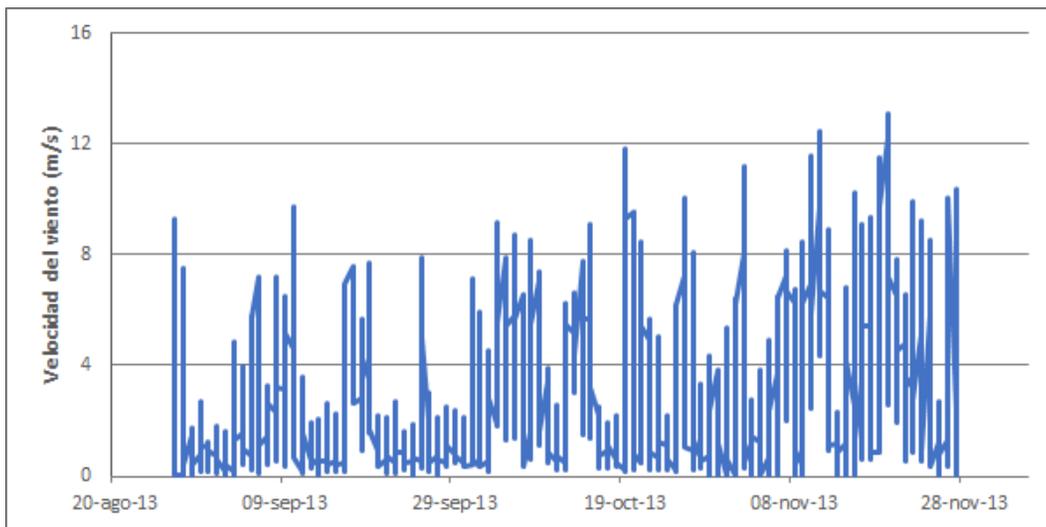


Fig. 4.2.4.4-B. Velocidad del viento promedio hora en la estación Exploradores. Segundo periodo de registro.

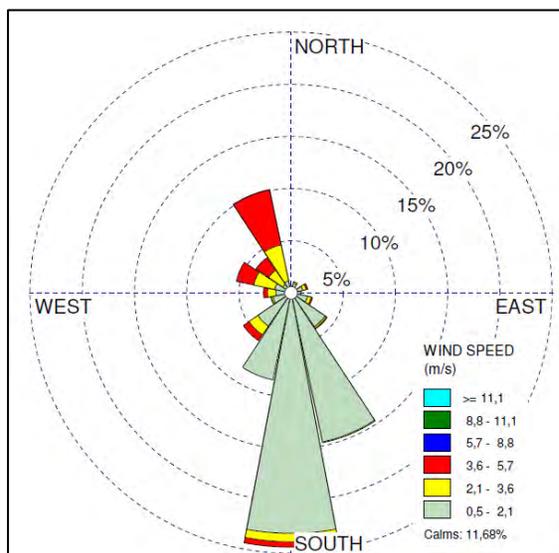


Fig. 4.2.4.4-C. Rosa de los vientos en estación Exploradores. Primer periodo de registro.



Fig. 4.2.4.4-D. Rosa de los vientos en estación Exploradores. Primer periodo de registro. Fuente de la imagen: Google Earth.

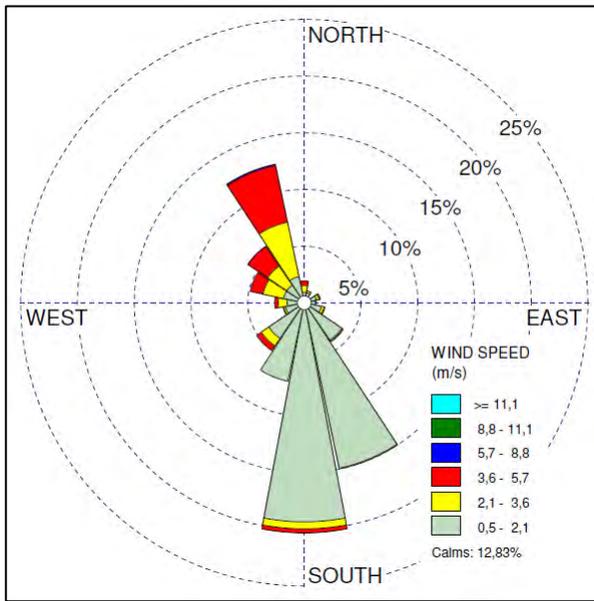


Fig. 4.2.4.4-E. Rosa de los vientos en estación Exploradores. Segundo periodo de registro.



Fig. 4.2.4.4-F. Rosa de los vientos en estación Exploradores. Segundo periodo de registro. Fuente de la imagen: Google Earth.

4.2.4.5. **Altura de nieve**

No se analizarán los datos registrados con el sensor de altura de nieve ya que durante el periodo de acumulación el sensor registró valores fuera de rango y además, durante el periodo de ablación, los valores registrados no representan los cambios en la altura del hielo debido a que el sensor se encuentra adosado a la estación meteorológica Exploradores con trípode de tipo GEUS que descansa sobre la superficie de hielo, y que por lo tanto no es capaz de medir la ablación sino que solamente puede medir la acumulación.

4.2.4.6. **Radiación de onda corta**

La radiación de onda corta incidente promedio en el periodo fue de 174 W/m^2 , con un máximo de 1.292 W/m^2 . La radiación de onda corta reflejada promedio fue de 50 W/m^2 , con un máximo de 389 W/m^2 .

En las Figs. 4.2.4.6-A y B se presentan los datos horarios la radiación de onda corta incidente y reflejada para los dos periodos de registro. Se observa un comportamiento normal, en que los peaks diarios mayores se presentan en el verano en diciembre y enero, cercanos al solsticio de verano del 21 de diciembre. Después de febrero los peaks diarios comienzan a descender a medida que se acerca el invierno. Además de la oscilación estacional de los máximos diarios, se observan oscilaciones relacionadas a la cobertura de nieve y tormentas como la disminución de los máximos diarios durante algunos días de diciembre. Para el segundo periodo de registro la radiación de onda corta incidente y reflejada se mantiene constante aumentando levemente durante el mes de noviembre.

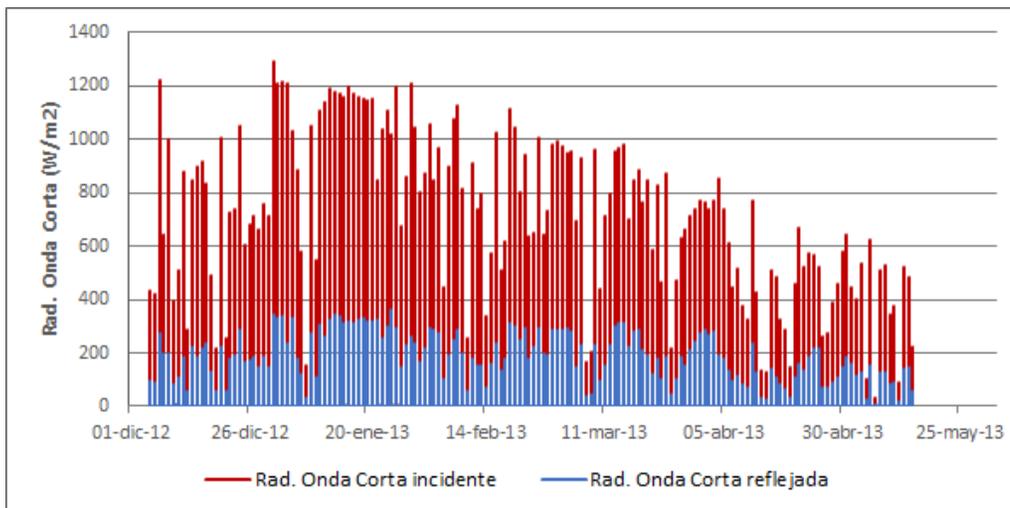


Fig. 4.2.4.6-A. Radiación de onda corta incidente y reflejada promedio hora en la estación Exploradores. Primer periodo de registro.

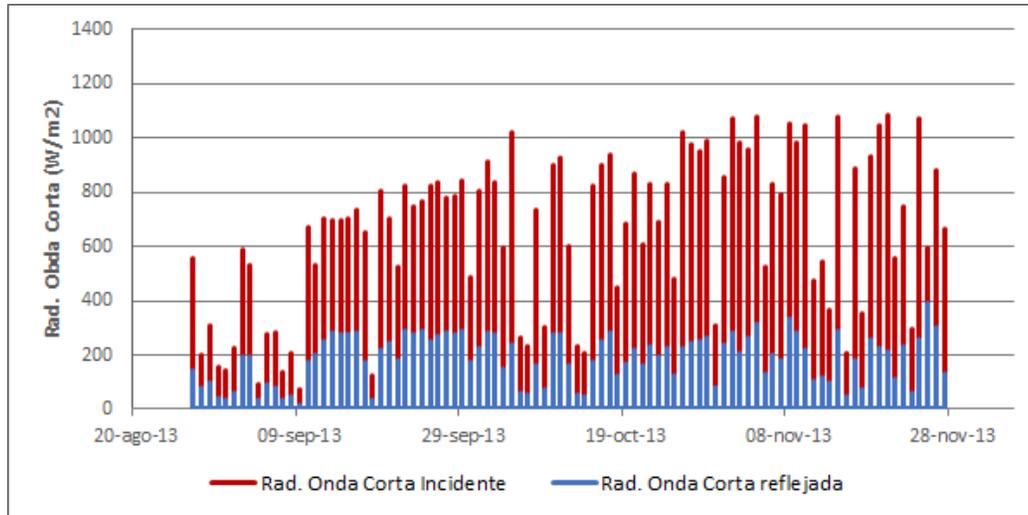


Fig. 4.2.4.6-B. Radiación de onda corta incidente y reflejada promedio hora en la estación Exploradores. Segundo periodo de registro.

4.2.4.7. ***Radiación de onda larga***

La radiación de onda larga incidente promedio en el periodo fue de 353 W/m^2 , con un máximo de 428 W/m^2 y un mínimo de 260 W/m^2 . La radiación de onda larga emitida por la superficie tuvo un promedio igual a 354 W/m^2 , un máximo de 420 W/m^2 y un mínimo de 306 W/m^2 . El balance de radiación de onda larga es muy cercano a cero, es decir que la energía que llega es muy similar a la energía que sale de la superficie por lo que en el balance general la radiación de onda larga prácticamente no aporta ni resta energía.

En las Figs. 4.2.4.7-A y B se presentan los datos horarios de la radiación de onda larga incidente y emitida por la superficie. Se observa que ambas radiaciones son similares, pero la radiación de onda larga incidente tiene una mayor variación, lo que es esperado ya que la radiación de onda larga es proporcional a la temperatura y la atmósfera sufre mayores cambios de temperatura y composición que la superficie.

Altas radiaciones de onda larga incidente ocurren en climas húmedos y lluviosos con altas coberturas de nubes como ocurre en la Patagonia, en climas más secos como la zona central de Chile la radiación de onda larga incidente suele ser menor.

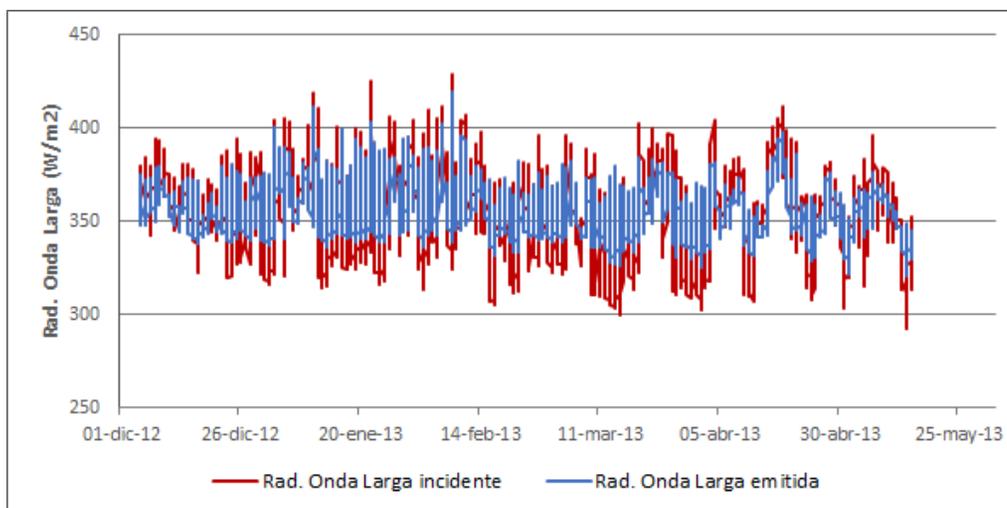


Fig. 4.2.4.7-A. Radiación de onda larga incidente y emitida promedio hora en la estación Exploradores. Primer periodo de registro.

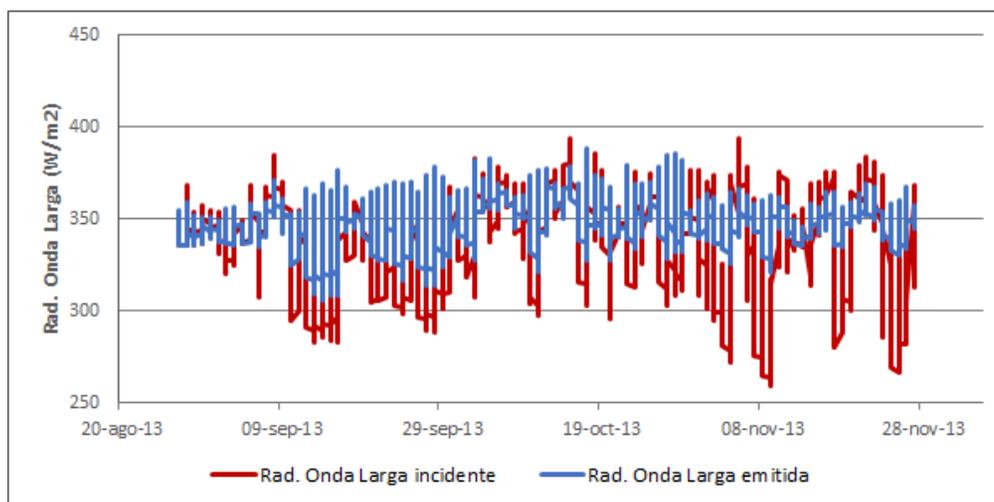


Fig. 4.2.4.7-B. Radiación de onda larga incidente y emitida promedio hora en la estación Exploradores. Segundo periodo de registro.

4.2.5. Balances

4.2.5.1. *Balace glaciológico*

Para estimar el balance de masa en el glaciar Exploradores se instalaron 12 balizas distribuidas en 3 perfiles transversales y 1 perfil longitudinal (ver Fig. 4.2.5.1-A). Para

instalar cada baliza se perforó en hielo a una profundidad aproximada de 2 m para insertar las balizas, de manera de cuantificar la ablación en la campaña siguiente que debía efectuarse 1 mes después. Las fechas de registro de altura de balizas en el glaciar Exploradores son el 15 abril, fecha de instalación y primer control, y el 15 de mayo que corresponde al segundo control.

La estimación de la masa perdida en el periodo registrado se calcula primero restando la altura de las balizas sobre la superficie entre las dos fechas controladas. Luego para calcular el equivalente en agua se multiplica la diferencia de altura por la densidad. En las dos fechas controladas se observó en terreno que la superficie de los glaciares donde se instalaron las balizas correspondía a hielo por lo que el cálculo de masa se realizó con una densidad igual a 0,9 gr/cm³.

La ablación promedio calculada en el glaciar Exploradores entre el 15 de abril y el 15 de mayo es de 119 cm eq.a. con una tasa promedio de 4,0 cm eq.a /día, una tasa bastante alta para el fin del periodo de ablación. Sin embargo en la Patagonia estos valores son comunes ya que la ablación se debe principalmente al calor sensible aportado por la atmósfera, al calor aportado por la precipitación y no tanto a la energía radiactiva de onda corta emitida por el sol.

En la Tabla 4.2.5.1-A se presentan los datos de ablación en cada baliza del glaciar Exploradores.

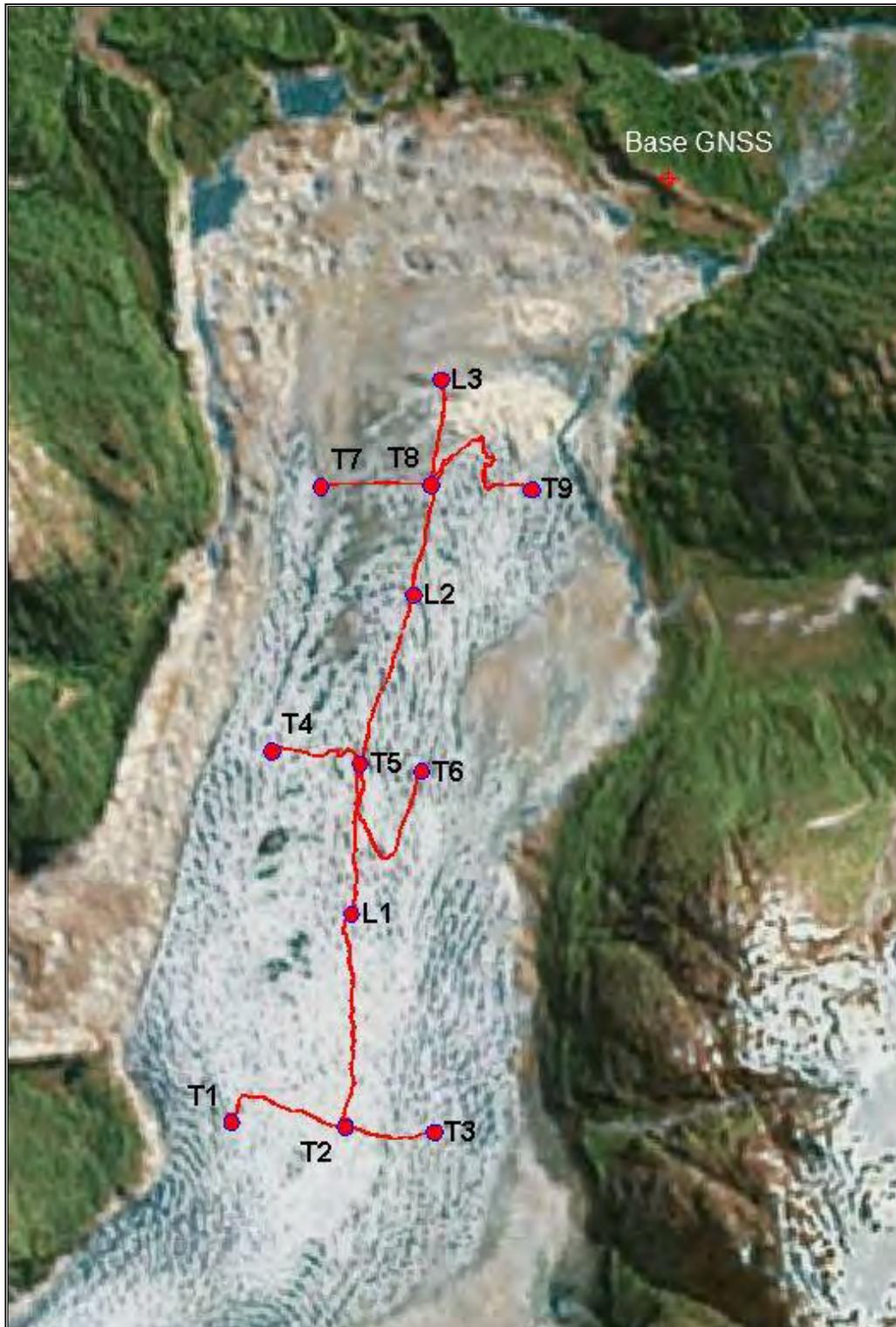


Fig. 4.2.5.1-A. Ubicación de las balizas en el glaciar Exploradores. Fuente de la imagen: Google Earth.

Tabla 4.2.5.1-A. Ablación medida en las balizas del glaciar Exploradores.

Baliza	Fecha instalación	Fecha control	Cant. de días	Dif. (cm)	Ablación (cm eq.a.)	Tasa ablación (cm eq.a./día)
L1	15-04-2013	15-05-2013	30	120	108	3,6
L2	15-04-2013	15-05-2013	30	120	108	3,6
L3	15-04-2013	15-05-2013	30	137	123	4,1
T1	15-04-2013	15-05-2013	30	115	104	3,5
T2	15-04-2013	15-05-2013	30	110	99	3,3
T3	15-04-2013	15-05-2013	30	148	133	4,4
T4	15-04-2013	15-05-2013	30	147	132	4,4
T5	15-04-2013	15-05-2013	30	120	108	3,6
T6	15-04-2013	15-05-2013	30	135	122	4,1
T7	15-04-2013	15-05-2013	30	143	129	4,3
T8	15-04-2013	15-05-2013	30	141	127	4,2
T9	15-04-2013	15-05-2013	30	152	137	4,6
Promedio					119	4,0

Posteriormente se estimó el balance de masa para toda la zona de ablación del glaciar, esto se realizó extrapolando los datos de ablación de las balizas mediante la construcción de polígonos de Thiessen (ver Fig. 4.2.5.1-B). La extrapolación se acotó a la zona de ablación ya que la medición realizada en las balizas solo es representativa de esta zona. Para la delimitación de la zona de ablación se consideró la línea de equilibrio en la cota 1187 m s.n.m. definida por Rivera et al, 2007. La zona de ablación presenta una superficie de 32,1 km². El resultado estimado del balance de masa para periodo del 15 abril al 15 de mayo del 2013 corresponde a pérdidas de 37x 10⁶ m³ eq.a.

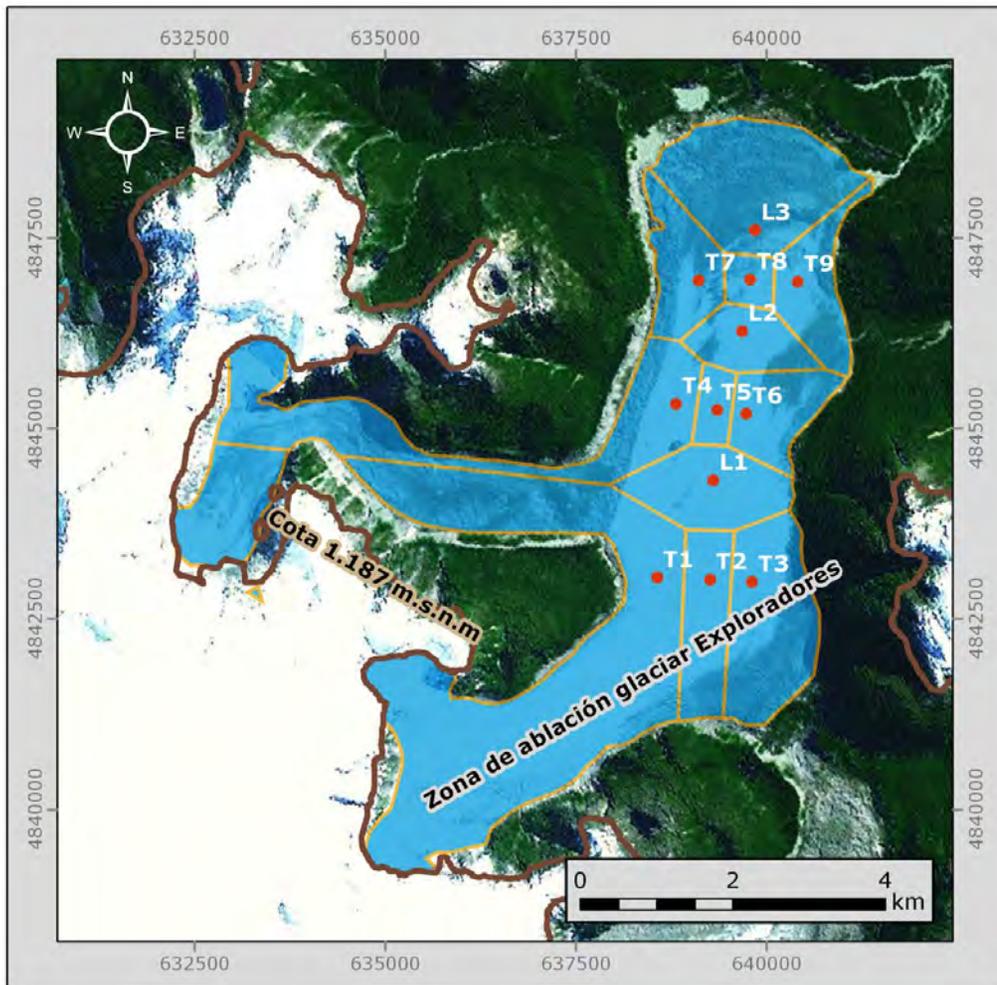


Fig. 4.2.5.1-B. Polígonos de Thiessen utilizados en la zona de ablación del glaciar Exploradores. Imagen de fondo Ikonos, febrero 2011.

4.2.5.2. **Balace de energía**

El balance de energía se realizó en el glaciar Exploradores en el punto de la estación meteorológica sobre el glaciar en el periodo en que se cuenta con los datos necesarios para la estimación de los flujos de energía entre el 1 y el 27 de noviembre de 2013.

Los datos meteorológicos utilizados corresponden a la temperatura del aire humedad relativa presión atmosférica velocidad del viento radiación de onda corta incidente y reflejada y radiación de onda larga incidente y emitida todos registrados a 2 m del suelo.

y presentados en la sección 4.2.4. La precipitación utilizada es la registrada en la estación del Glaciar San Rafael que se encuentra en la laguna San Rafael en las coordenadas UTM 18G 586.240 E y 4.834.437 S. a una altitud de 5 m s.n.m. La estación Glaciar San Rafael se encuentra aproximadamente a 55 km al suroeste de la estación en el glaciar Exploradores.

La temperatura promedio en el periodo es de 6,2 °C. con temperaturas positivas un 99% del tiempo (Fig. 4.2.4.1-A). La humedad relativa es alta durante todo el periodo con un promedio igual a 83% ver Fig. 4.2.4.2-A. La velocidad del viento es relativamente baja para un glaciar con un promedio igual 3,6 m/s. ver Fig. 4.2.4.4-B. La presión atmosférica tiene un promedio igual a 877 mb ver Fig. 4.2.4.3-B. La radiación onda corta incidente es baja debido a la alta nubosidad con un promedio igual a 176 W/m² (ver Fig. 4.2.4.6-A y B). La radiación de onda corta reflejada tiene un promedio igual a 48 W/m² que da un albedo promedio igual 0,3. Este valor de albedo corresponde a la transición entre hielo limpio y hielo con detritos (Cuffey y Paterson. 2010), que coincide con la situación del hielo en el lugar de la estación meteorológica. En La Fig. 4.2.5.2-A se presentan los valores horarios de albedo, que se encuentran en el rango 0,1 y 0,9 donde se observa que el albedo disminuye levemente al avanzar la temporada de ablación. Las radiaciones de onda larga incidente y emitida son muy similares en promedio. 340 W/m² y 349 W/m² respectivamente debido a la alta nubosidad en la zona (ver Fig. 4.2.4.7-B).

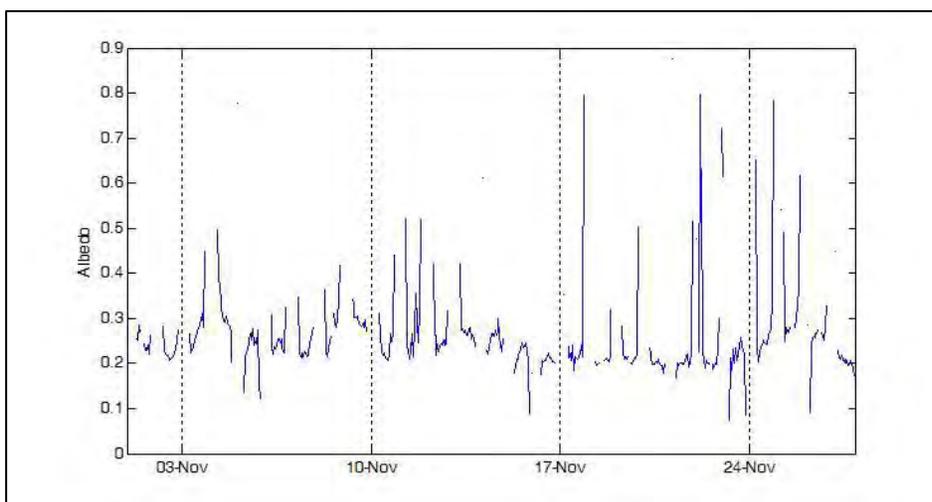


Fig. 4.2.5.2-A. Albedo promedio horario.

Los datos de precipitación horaria se presentan en la Fig.4.2.5.2-B donde se observa que solo ocurrieron precipitaciones importantes entre el 25 y 27 de noviembre de 2013. Las precipitaciones totales en el periodo fueron de 821 mm.

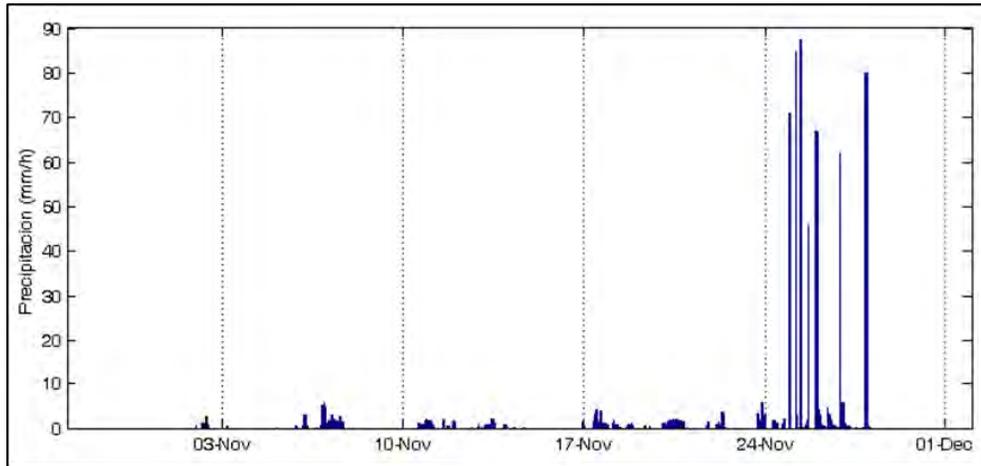


Fig. 4.2.5.2-B. Precipitación en mm/h.

La metodología utilizada para estimar el balance de energía es igual a la metodología explicada en el punto 2.5.3.1 pero en este caso se incluye la energía aportada por la precipitación como se presenta en la siguiente ecuación:

$$Q_M = R_{Snet} + R_{Lnet} + Q_S + Q_L + Q_p$$

Donde Q_M es la energía disponible para la fusión. R_{Snet} es el balance de la radiación de onda corta. R_{Lnet} es el balance de radiación de onda larga. Q_S es el flujo de calor sensible. Q_L es el flujo de calor latente y Q_p es el calor aportado por la precipitación.

La energía aportada por la precipitación líquida se estima con la siguiente fórmula:

$$Q_p = \rho * C * T * Pp$$

Donde ρ es la densidad del agua en kg/m^3 . C es el calor específico del agua ($4,182 \times 10^{-3} \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$). T es la temperatura del aire en $^\circ\text{C}$. Pp es la intensidad de la

precipitación en m/s.

Los resultados del balance muestran que la principal entrada de energía en el periodo estudiado (1 a 27 de noviembre de 2013) es la radiación de onda corta neta (RS_{net}) que corresponde a un 70% de la entrada total de energía, a pesar de que los días nublados disminuyen significativamente la radiación de onda corta incidente, como se observa en la Fig. 4.2.4.6-A. La entrada de energía a través del calor sensible (Q_s) representa un 30% de la entrada total de energía. Este aporte se debe a que la temperatura es positiva la mayor parte del tiempo y con un promedio bastante alto debido a la baja altitud del glaciar en esta zona. El aporte de energía por la precipitación (Q_p) es depreciable debido a que el monto de precipitación en el periodo no es suficiente para aportar un monto de energía considerable a la superficie. La pérdida de energía por radiación de onda larga neta (RL_{net}) es pequeña debida a que los días nublados la radiación de onda larga incidente y emitida es muy similar, ver Fig. 4.2.4.7-A. La pérdida de energía por el flujo de calor latente (Q_L) es un 20% de la energía disponible para la ablación mucho menor a la energía disponible para la fusión (Q_M). Esto se debe a que la humedad relativa es alta (promedio en el periodo igual a 83%) y por lo tanto la diferencia entre la presión de vapor (promedio 787 Pa) y la presión de vapor saturado (promedio 967 Pa) es pequeña. Además de que la velocidad del viento es relativamente baja lo que disminuye el intercambio de flujos turbulentos. La energía disponible para la fusión que corresponde al total del balance es positiva el 99% del tiempo y sigue un ciclo diario muy similar a la radiación solar incidente que corresponde al principal aporte de energía, ver Fig. 4.2.5.2-D.

En la Tabla 4.2.5.2-A se presenta el promedio de los flujos de energía estimados en el periodo 1 al 27 de noviembre 2013, y en la Fig. 4.2.5.2-C se presentan los flujos de energía promedios horarios.

Tabla 4.2.5.2-A Flujos de energía promedio, periodo 1 al 27 noviembre 2013.

Q_M	RS_{net}	RL_{net}	Q_L	Q_s	Q_p
(W/m ²)					
138,9	127,9	-8,7	-33,6	53,3	0,0

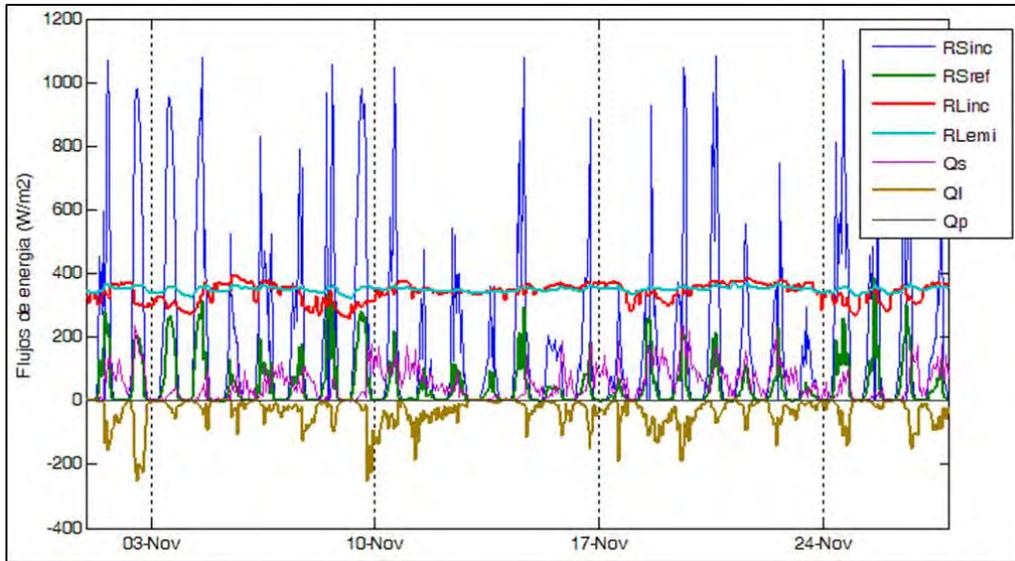


Fig. 4.2.5.2-C. Flujos de energía promedio horario.

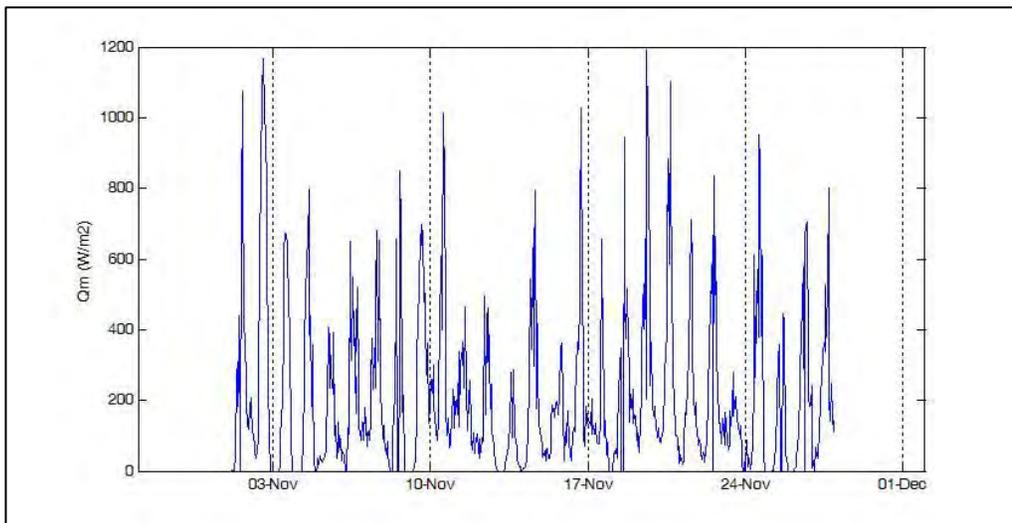


Fig. 4.2.5.2-D. Energía disponible para la fusión promedio horario.

Con los flujos de calor latente y energía disponible para la fusión se calcula la ablación en el periodo siguiendo la misma metodología explicada en el capítulo 2.5.3.1.

La densidad se estimó igual a $0,83 \text{ gr/cm}^3$ que corresponde al valor mínimo la densidad típica del hielo (Cuffey y Paterson, 2010).

La ablación total estimada en el periodo es de 1,20 m eq.a., de los cuales 0,03 m eq.a. son de sublimación y 1,17 m eq.a. de fusión. Se debe tener en cuenta que el balance energético no fue validado ya que no se cuenta con datos de altura de nieve o ablación, por lo que sus resultados se deben considerar con precaución.

La tasa de ablación promedio estimada en este estudio es igual a 45 mm eq.a./día, similar a las tasas de 47 mm eq.a./día y 55 mm eq.a./días, estimadas los últimos días de diciembre 2006 y los primeros días de enero 2007, respectivamente por Konya y Matsumoto (2010).

4.3. GLACIAR TYNDALL

4.3.1. Trabajos de terreno

Así como en el glaciar Exploradores y los de la zona central, en el Tyndall se efectuaron tres campañas, la primera en Abril para instalar y controlar con DGPS una transecta de balizas y bajar los datos de la estación meteorológica ubicada sobre el hielo, en esa ocasión también se controló con DGPS una red de balizas instaladas en la transecta japonesa. La segunda en Mayo para controlar la red de balizas instalada en la primera campaña y bajar los datos de la estación meteorológica. La tercera en Noviembre para reinstalar y controlar con DGPS la red de balizas, descargar los datos de la estación meteorológica e implementar el sistema de transmisión de datos vía satélite.

En estas campañas participó un número variable de personas, entre tres y cinco, de acuerdo a las actividades que se debían realizar en cada campaña. El acceso se efectuó a pie, con apoyo de caballos en la primera y tercera campaña, en la segunda no conseguimos caballos debido a lo avanzado que se encontraba el otoño. El grupo instaló en cada campaña un campamento en las cercanías del glaciar, en el punto donde se llegaba con los caballos y se encuentra la base para instalar el DGPS, desde este lugar se realizaron salidas diarias hasta completar los trabajos.

La tercera campaña resultó más complicada de lo esperado por las condiciones de la superficie del glaciar, que se encontraba cubierta por una delgada capa de nieve que cubría las grietas pero no estaba lo suficientemente firme para transitar en forma segura

sobre ellas. Esto causó una demora que obligó al grupo a retirarse del lugar dejando inconcluso algunos trabajos correspondientes a esta campaña. Debimos regresar nuevamente, a fines de noviembre, cuando las condiciones en la superficie del glaciar fueron seguras, para terminar lo que quedó pendiente.

4.3.1.1. ***Instalación y control de Balizas***

4.3.1.1.1 Campaña N°1

En la campaña de terreno realizada del 4 al 11 de abril de 2013, se ejecutó la instalación de balizas, según el plan presentado a la DGA, en la denominada transecta Japonesa, en el sector llamado lóbulo Zapata en el glaciar Tyndall, CHPS. En cada punto se eligió la mejor ubicación que contara con espacio suficiente para asegurar su estabilidad y permanencia durante el tiempo necesario para cuantificar la ablación. Se perforó el hielo con taladro manual Ice Auger de Kovacs a una profundidad de 150 cm (Fig. 4.3.1.1.1-A).



Fig. 4.3.1.1.1-A. Instalación de balizas en perforaciones en hielo.

Las balizas estaban constituidas por 2 secciones de tubo de PVC H10 (hidráulico, de alta presión) de 27 mm de diámetro interior, 32 mm de diámetro exterior y un largo de 1.5 m c/u, unidas con pegamento para PVC expandiendo la sección inferior de PVC de modo de embutir la sección superior y posteriormente pegar ambas secciones con pegamento,

resultando en un largo de 3 m. Las posiciones y alturas de cada baliza se muestran en la Tabla 4.3.1.1.1-A.

Tabla 4.3.1.1.1-A. Posición de balizas en el glaciar Tyndall. Coordenadas expresadas en proyección UTM huso 18 sur, sistema geodésico WGS84.

BALIZA	FECHA	UTM E (m)	UTM N (m)	Largo baliza (cm)	Altura vertical (cm)
BORDE1	08-04-2013	618.773,53	4.334.678,58	s/baliza	s/baliza
T2	08-04-2013	618.478,44	4.334.480,26	300	150
T3	08-04-2013	618.131,80	4.334.289,22	300	150
T4	08-04-2013	617.797,80	4.334.114,28	300	150
T5	08-04-2013	617.479,27	4.333.939,55	300	150
T6	08-04-2013	617.163,73	4.333.759,48	300	150
T7	08-04-2013	616.830,83	4.333.582,81	300	150
T8	08-04-2013	616.490,88	4.333.406,13	300	150
T9	08-04-2013	616.151,70	4.333.232,50	300	150
T10	08-04-2013	615.824,21	4.333.039,93	300	150
T11	08-04-2013	615.500,48	4.332.805,42	300	150
T12	08-04-2013	615.148,58	4.332.658,01	300	150
T13	08-04-2013	614.866,05	4.332.430,07	300	150

4.3.1.1.2 Campaña N°2

Las balizas de PVC instaladas durante la campaña N°1 fueron medidas con huincha de medir metálica para determinar su extensión sobresaliente del hielo. Adicionalmente se realizó la medición de ablación en las balizas de la transecta Raymond. Las balizas de esta transecta instalada con fecha 17-11-2012 por la DGA constan de secciones de 1,5 m de largo unidas por un cordón interior (Fig. 4.3.1.1.2-A).



Fig. 4.3.1.1.2-A. Mediciones de balizas en transecta Raymond, mayo de 2013.

4.3.1.1.3 Campaña N°3

Entre el 21 al 27 de noviembre se llevó a cabo la segunda parte de la tercera campaña para concluir con la instalación y control de balizas de la transecta Japonesa. En esa oportunidad las condiciones para transitar sobre el glaciar eran más seguras que a principios de noviembre, lo que permitió avanzar con mayor rapidez y terminar con la instalación de balizas. Las balizas están construidas en base a 7 secciones de PVC naranja de 16 mm de diámetro y 1,5 m de largo (10,5 m de largo) unidas entre sí con cordón de 3 mm de espesor. Se instalaron en perforaciones de 10 metros de profundidad realizadas en el hielo con taladro a vapor, lo cual deja al inicio 0,5 m de baliza al exterior (ver Figs. 4.3.1.1.3-A , B y C). La distribución general puede ser vista en la Fig. 4.3.1.1.3-D, y los datos se muestran en la Tabla 4.3.1.1.3-A.



Fig. 4.3.1.1.3-A. Perforando el hielo con taladro a vapor protegido por una carpa durante la operación con condiciones de viento.



Fig. 4.3.1.1.3-B. Vista del interior de la carpa de protección durante la perforación en hielo.



Fig. 4.3.1.1.3-C. Baliza T8 recién instalada junto al taladro de hielo.

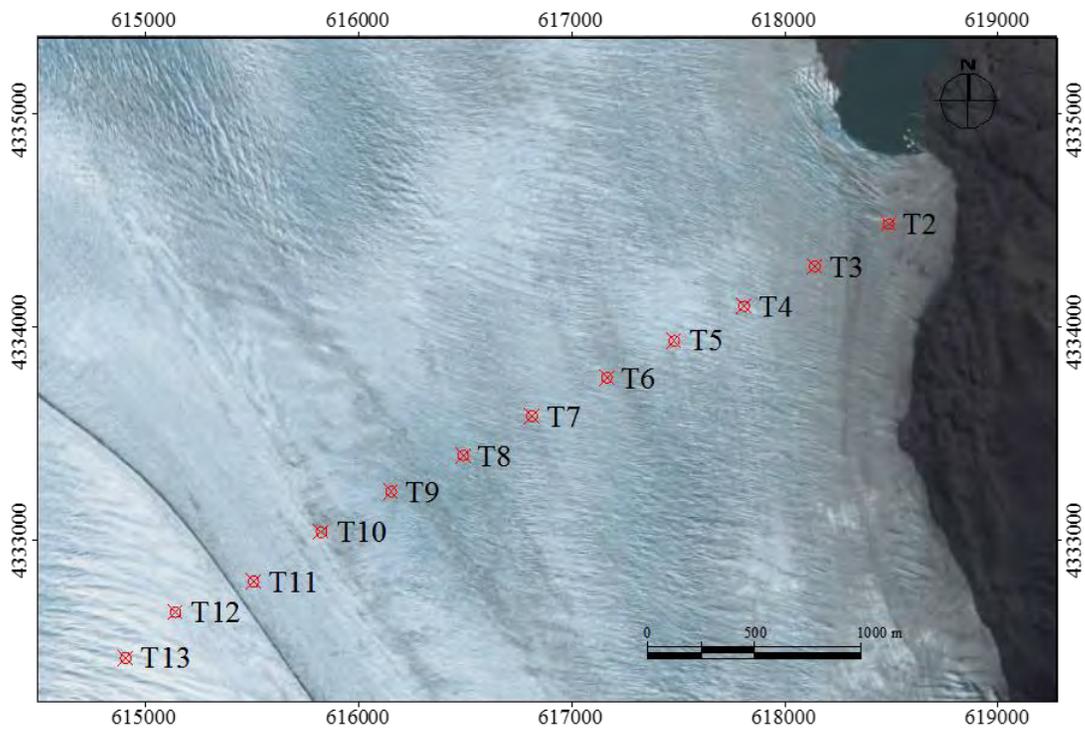


Fig. 4.3.1.1.3-D. Ubicación de las balizas instaladas el mes de noviembre de 2013 en el glaciar Tyndall, sobre la transecta Japonesa. Fuente de imagen Bing Maps.

Tabla 4.3.1.1.3-A. Fecha de instalación y medición de las balizas en el glaciar Tyndall.

Glaciar	Baliza	Fecha	Largo baliza (cm)	Baliza fuera del hielo (cm)
Tyndall	T2	22-10-2013	1.050	50
Tyndall	T3	23-10-2013	1.050	50
Tyndall	T4	23-10-2013	1.050	50
Tyndall	T5	23-10-2013	1.050	50
Tyndall	T6	24-10-2013	1.050	50
Tyndall	T7	24-10-2013	1.050	50
Tyndall	T8	23-11-2013	1.050	50
Tyndall	T9	23-11-2013	1.050	50
Tyndall	T10	23-11-2013	1.050	50
Tyndall	T11	23-11-2013	1.050	50
Tyndall	T12	23-11-2013	1.050	50
Tyndall	T13	23-11-2013	1.050	50

4.3.1.2. **Mediciones DGPS**

4.3.1.2.1 Campaña N°1

La primera campaña de mediciones DGPS se realizó entre los días 7 y 8 de abril de 2013. Para realizar las mediciones estáticas y cinemáticas se implementó una estación base sobre roca firme a unos 200 m el campamento base (Cañadón Doña Rosa), camino al lóbulo Zapata (ver Fig. 4.3.1.2.1-A).



Fig. 4.3.1.2.1-A. Estación base GNSS (BTDL) instalada en roca firme en las cercanías del campamento base.

Las balizas se midieron con un receptor GNSS en modo estático (Fig. 4.3.1.2.1-B), y en el trayecto se realizó una medición en modo cinemático (Fig. 4.3.1.2.1-C).



Fig. 4.3.1.2.1-B. Medición GNSS estática mediante tubo de PVC (ver texto) en puntos de balizas perforados en hielo.



Fig. 4.3.1.2.1-C. Medición GNSS en modo cinemático.

La medición estática se realizó sin trípode, montando la antena GNSS sobre un tubo de PVC de 40 mm exterior, grosor de unos 3 mm y de 20 cm de largo que contenía un perno de 5/8" en un extremo, donde se atornillaba la antena. Este tubo de 20 cm de largo se insertaba en la perforación en hielo correspondiente a cada baliza, con un tope constituido por una barra horizontal metálica o plástica de modo que el tubo no cayera en la perforación. La altura de antena resultó ser de 23 cm. Debido al retroceso del glaciar la posición de la baliza T1 correspondía a roca, por lo que se comenzó con la baliza T2, y se agregó una nueva baliza T13, midiendo también la posición del borde del glaciar.

Para calcular la estación base implementada para controlar el glaciar Tyndall (BTDL) se utilizaron las observaciones del día 8 de abril de 2013, de la estación base permanente PARC ubicada en Punta Arenas y la sesión de 10 horas de medición estática de la estación BTDL. La línea base entre PARC y la estación Base BTDL es de cerca de 278 km y las precisiones alcanzadas fueron del orden de 0,02 m en la horizontal y 0,033 m en la vertical. Las coordenadas de la estación base implementada para controlar el glaciar Tyndall (BTDL) se muestran en la Tabla 4.3.1.2.1-A.

Tabla 4.3.1.2.1-A. Coordenadas estación base glaciar Tyndall (BTDL).

COORDENADAS WGS84 PUNTO BASE BTDL			
Este	620051.260 m	Latitud	S51°07'15.81660"
Norte	4335313.422 m	Longitud	W73°17'04.57952"
Elevacion	407.145 m	Altura	422.567 m

El post proceso de coordenadas de las balizas y levantamiento cinemático se realizó utilizando el software TBC. Los resultados obtenidos presentaron precisiones no menores a los 0,03 cm en horizontal y vertical en las sesiones estáticas y sub decimétrica en modo cinemático. Las coordenadas obtenidas luego del postproceso se muestran en la Tabla 4.3.1.2.1-B.

Tabla 4.3.1.2.1-B. Coordenadas de las balizas sobre el glaciar Tyndall. 8 abril 2013. Coordenadas expresadas en proyección UTM huso 18 sur, sistema geodésico WGS84, altura elipsoidal (m) y altura ortométrica (m s.n.m) según el modelo geoidal EGM06.

Baliza	UTM E (m)	UTM N (m)	Altura elipsoidal (m)	Altura ortométrica (m s.n.m.)
T2	618.478,44	4.334.480,26	536,07	551,53
T3	618.131,80	4.334.289,22	560,28	575,74
T4	617.797,80	4.334.114,28	568,49	583,96
T5	617.479,27	4.333.939,55	570,50	584,97
T6	617.163,73	4.333.759,48	569,71	585,19
T7	616.830,83	4.333.582,81	570,68	586,17
T8	616.490,88	4.333.406,13	576,90	592,39
T9	616.151,70	4.333.232,50	573,89	589,38
T10	615.824,21	4.333.039,93	564,82	580,32
T11	615.500,48	4.332.805,42	553,71	569,21
T12	615.149,25	4.332.658,20	555,24	570,74
T13	614.866,05	4.332.430,07	564,00	579,51

4.3.1.2.2 Campaña N°2

La segunda campaña de mediciones DGPS se realizó el día 5 de mayo de 2013 y consistió en la medición en modo estático de las balizas instaladas sobre la transecta Japonesa en el mes de abril de 2013 (Fig. 4.3.1.2.2-A). De manera adicional se realizó un

levantamiento Stop & Go sobre la transecta Raymond, logrando obtener coordenadas de 9 balizas y un levantamiento cinemático a lo largo de dicha transecta. Las coordenadas obtenidas en las balizas de ambas transectas se muestran en las Tablas 4.3.1.2.2-A y B.

Tabla 4.3.1.2.2-A. Coordenadas de las balizas sobre la transecta Japonesa en el glaciar Tyndall, al momento del segundo control el 10 de mayo de 2013. Coordenadas expresadas en proyección UTM huso 18 sur, sistema geodésico WGS84, altura elipsoidal (m) y altura ortométrica (m s.n.m) según el modelo geoidal EGM06.

Baliza	UTM E (m)	UTM N (m)	Altura elipsoidal (m)	Altura ortométrica (m s.n.m)
T2	618.479,90	4.334.480,74	535,31	550,76
T3	618.133,40	4.334.288,57	559,93	575,39
T4	617.799,94	4.334.111,67	568,09	583,55
T5	617.482,51	4.333.933,77	569,90	585,37
T6	617.168,95	4.333.749,14	569,01	584,48
T7	616.838,55	4.333.567,17	569,54	585,02
T8	616.501,60	4.333.384,64	575,48	590,97
T9	616.159,58	4.333.212,06	572,22	587,71
T10	615.837,35	4.333.015,17	563,10	578,59
T11	615.516,79	4.332.780,90	552,17	567,67
T12	615.169,87	4.332.634,59	558,48	573,98
T13	614.892,62	4.332.408,27	561,86	577,37

Tabla 4.3.1.2.2-B. Coordenadas de las balizas sobre la transecta Raymond en el glaciar Tyndall. 10 de mayo de 2013. Coordenadas expresadas en proyección UTM huso 18 sur. sistema geodésico WGS84, altura elipsoidal (m) y altura ortométrica (m s.n.m) según el modelo geoidal EGM06.

Baliza	UTM E (m)	UTM N (m)	Altura elipsoidal (m)	Altura ortométrica (m s.n.m.)
B2	618.337,65	4.334.481,75	549,76	565,21
B3	617.944,20	4.334.334,10	565,33	580,79
B4	617.558,25	4.334.129,50	570,05	585,52
B5	617.212,00	4.333.857,70	568,64	584,11
B6	616.803,80	4.333.645,50	571,57	587,05
B7	616.442,55	4.333.466,85	575,93	591,41
B8	616.003,20	4.333.325,95	573,86	589,35
B9	615.547,60	4.333.163,80	570,67	586,16
B10	615.066,05	4.333.031,30	569,98	585,48

La Fig. 4.3.1.2.2-A muestra las posiciones de las balizas y los levantamientos cinemáticos en el sector lóbulo Zapata del glaciar Tyndall.

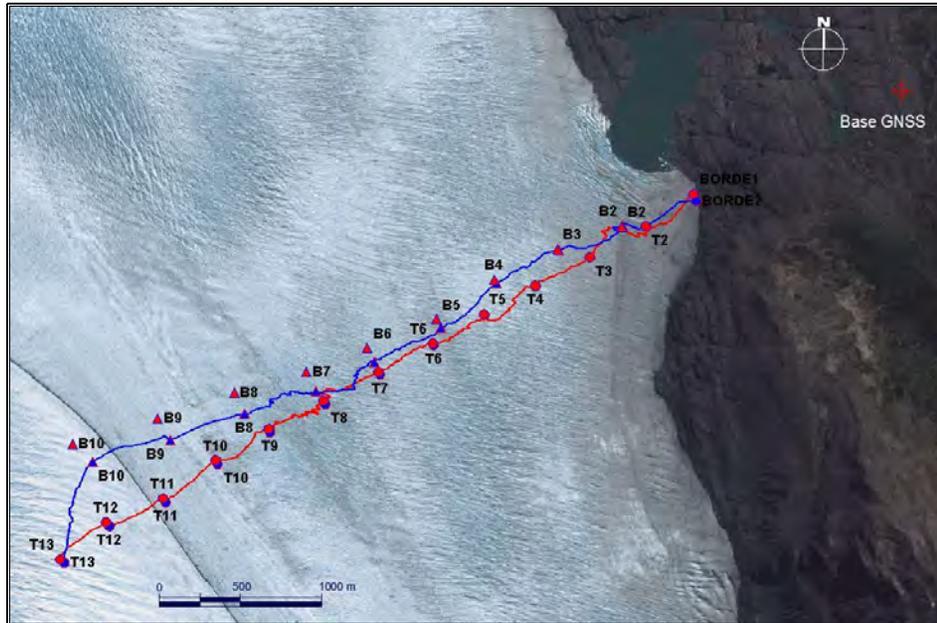


Fig. 4.3.1.2.2-A. Los círculos rojos (8 abril 2013) y azules (10 mayo 2013) representan las mediciones estáticas sobre la transecta Japonesa. los triángulos rojos (17 noviembre 2012) y azules (10 mayo 2013) las mediciones estáticas sobre la transecta Raymond. la línea roja representa el levantamiento cinemático en la transecta Japonesa (10 mayo 2013). la línea azul el levantamiento cinemático en la transecta Raymond (10 mayo 2013).



Fig. 4.3.1.2.2-B. Control de posición de baliza con equipo GNSS en transecta Japonesa.

4.3.1.2.3 Campaña N°3

La tercera campaña se desarrolló entre los días 21 y 25 de octubre y 21 y 25 de noviembre. Se realizó en dos partes debido a las malas condiciones encontradas durante el primer intento en el mes de octubre. De acuerdo a los procedimientos se instaló el DGPS base (BTDL) en su posición cercana al campamento base, para luego realizar las mediciones en modo estático sobre cada una de las balizas, previamente instaladas. Las coordenadas obtenidas luego del postproceso se muestran en la Tabla 4.3.1.2.3-A. y la distribución a lo largo de la transecta Japonesa se aprecia en la Fig. 4.3.1.2.3-A.

Tabla 4.3.1.2.3-A. Ubicación de la balizas en el glaciar Tyndall. instaladas en octubre y noviembre de 2013. Coordenadas expresadas en proyección UTM huso 18 sur. sistema geodésico WGS84, altura elipsoidal (m) y altura ortométrica (m s.n.m) según el modelo geoidal EGM06.

Baliza	UTM E (m)	UTM N (m)	Altura elipsoidal (m)	Altura ortométrica (m s.n.m)
T2	618.486,81	4.334.483,64	536,03	551,49
T3	618.141,35	4.334.285,48	561,15	576,61
T4	617.809,43	4.334.099,30	569,17	584,64
T5	617.481,26	4.333.937,00	571,58	587,05
T6	617.164,72	4.333.763,46	571,30	586,77
T7	616.813,17	4.333.583,50	572,06	587,55
T8	616.491,04	4.333.398,81	577,16	592,64
T9	616.152,65	4.333.229,15	574,71	590,20
T10	615.826,55	4.333.040,73	566,31	581,81
T11	615.508,24	4.332.806,89	555,02	570,52
T12	615.142,73	4.332.664,49	561,98	577,49
T13	614.907,51	4.332.450,99	569,19	584,69

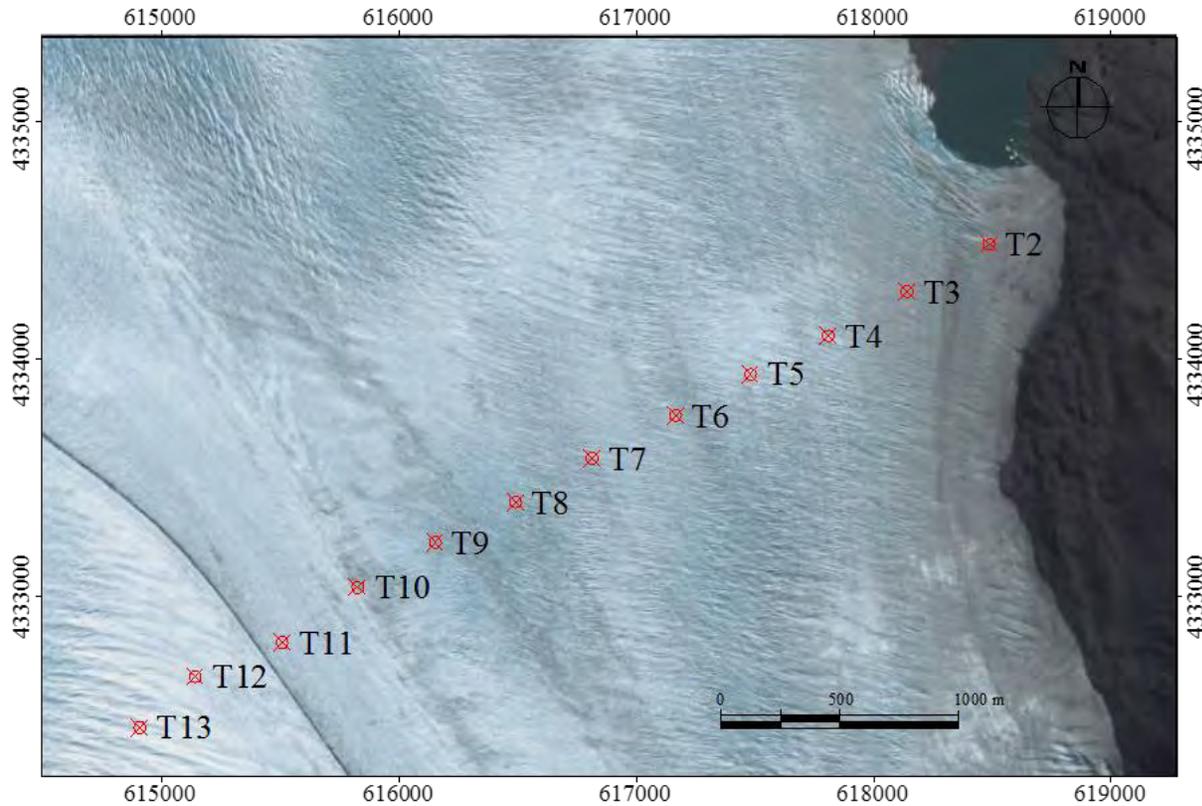


Fig. 4.3.1.2.3-A. Distribución de las balizas instaladas sobre la transecta Japonesa en el glaciar Tyndall.

4.3.1.3. *Estación meteorológica y transmisión Iridium.*

4.3.1.3.1 Campaña N°1

La AWS GEUS se encontraba operativa durante la 1ª campaña, pero se detectó que la referencia del norte del anemómetro estaba desfasado aproximadamente 180° y asimismo estaba inclinada de la vertical producto de la fuerte ablación del hielo y/o del fuerte viento. No se corrigió este desfase. En esta visita también se respaldaron los datos guardados en el data logger, esta operación no presentó ningún inconveniente y tampoco se detectaron fallos en los instrumentos de la AWS.

Una inspección preliminar de los datos obtenidos indica que la mayor parte del tiempo no existen datos de radiación incidente, salvo algunos breves periodos que muestran valores anómalos. También se observa que los valores de altura de la superficie son anómalos, con grandes variaciones en periodos cortos de tiempo. Ver Fig. 4.3.1.3.1-A.



Fig. 4.3.1.3.1-A. AWS GEUS instalada sobre el glaciar en la transecta Raymond levemente inclinada hacia la izquierda.

4.3.1.3.2 Campaña N° 2

Durante la segunda campaña al glaciar Tyndall, se efectuó una inspección visual de la estación meteorológica GEUS en la cual se pudo observar que la estructura se encontraba levemente inclinada. Debido a razones de tiempo no fue posible realizar las correcciones necesarias ni bajar datos desde el data logger.

4.3.1.3.3 Campaña N° 3

Durante la última campaña se conectó el modem "Global Modem" para transmisión de datos vía sistema Iridium. En esta oportunidad se realizaron ajustes de terreno y tensores para dejar la estación con la nivelación necesaria. Mediante llamadas por teléfono satelital se pudo constatar en terreno y en tiempo real que los datos estaban llegando correctamente a la oficina de Geoestudios (ver Figs. 4.3.1.3.3-A y B).



Fig. 4.3.1.3.3-A. Estacion meteorológica Tyndall correctamente nivelada y con sistema de transmisión de datos funcionando.

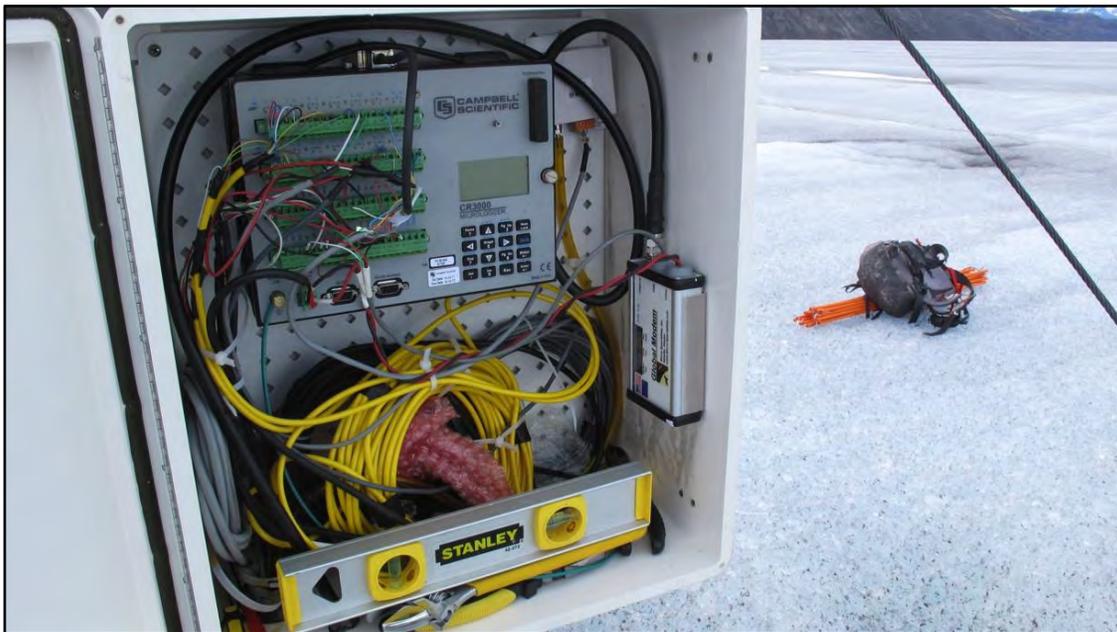


Fig. 4.3.1.3.3-B. En la figura se puede observar el modem "Global Modem" instalado a la derecha del data logger.

4.3.1.4. **Cámaras fotográficas secuenciales**

4.3.1.4.1 Instalación de cámaras automáticas

El día 11 de abril se realizó un viaje de reconocimiento al frente del glaciar Tyndall en el lago Geikie, para inspeccionar el acceso a esa zona y seleccionar la ubicación de instalación de las cámaras automáticas en el frente del glaciar. El desplazamiento a la zona se efectuó utilizando un bote semirrígido a motor para cruzar el río Serrano. y se continuó a pie desde 1 km aguas abajo de la desembocadura del río Tyndall en el río Serrano. El trayecto a pie ida y vuelta se realizó en 7,5 horas.

Las cámaras se recibieron en las oficinas de Geoestudios, las cuales se revisaron según el manual de procedimientos del software Digisnap (temporizador) elaborado por la DGA. Se comprobó el funcionamiento de las cámaras y de las baterías. Se construyeron los dos soportes de las cámaras en fierro galvanizado. La forma de la estructura es un trípode soportante, dos soportes se fijan de manera diagonal y uno de manera vertical, los que se fijan a la roca con pernos de anclaje. Sobre el tubo vertical se adosa mediante abrazaderas la caja que contiene la cámara fotográfica. el temporizador (Digisnap), dos baterías, un regulador de voltaje y los accesorios de soporte. La orientación de uno de los tubos es Norte en una inclinación de 45° para fijar el panel solar.

Las dos cámaras fotográficas fueron instaladas el día 2 de mayo 2013 en el frente del glaciar Tyndall, sector del lago Geikie, de acuerdo a la logística del viaje de reconocimiento efectuado el día 11 de abril. La ubicación de las cámaras se muestra en la Fig. 4.3.1.4.1-A. y su ubicación geográfica expresada en proyección UTM se presenta en la Tabla 4.3.1.4.1-A. Las cámaras se encuentran separadas a una distancia de 200 m y se denominan Cámara Norte y Cámara Sur.



Fig. 4.3.1.4.1-A. Ubicación de las cámaras automáticas en el glaciar Tyndall. La imagen del glaciar es de Google Earth y corresponde a marzo de 2011. La posición actual (2013) del frente del glaciar está frente a la ubicación de las cámaras.

Tabla 4.3.1.4.1-A. Coordenadas de los puntos de instalación de las cámaras automáticas. Coordenadas adquiridas con GPS tipo navegador. WGS84.

Nombre	UTM E (m)	UTM N (m)	Huso	Datum
Cámara Norte	621.712	4.321.353	18 F	WGS 84
Cámara Sur	621.734	4.321.151	18 F	WGS 84

En las Figs. 4.3.1.4.1-B y C se muestran las cámaras instaladas en su ubicación.



Fig. 4.3.1.4.1-B. Cámara Norte instalada a principios del mes de mayo 2013 en el frente del glaciar Tyndall, lago Geikie.



Fig. 4.3.1.4.1-C. Cámara Sur instalada a principios del mes de mayo 2013. en el frente del glaciar Tyndall, lago Geikie.

Las cámaras automáticas se han configurado para capturar 3 fotografías diarias. a las 12:00 h. 13:00 h y 14:00 h, hora local según horario de verano UTC-4. Los parámetros de programación y ajustes de las cámaras se presentan en la Tabla 4.3.1.4.1-B. y una fotografía capturada por la cámara Norte se muestra en la Fig. 4.3.1.4.1-D.

Tabla 4.3.1.4.1-B. Parámetros de ajuste de cámaras automáticas.

CAMARA	PARÁMETROS
MARCA	CANON
MODELO	EOS DIGITAL REBEL XS
MODO	Av
FOCO	INFINITO
APERTURA DEL LENTE	16
ISO/ASA	100
ORIENTACIÓN	OESTE
ESTABILIZADOR	OFF
AUTOFOCO	OFF
FOCO	INFINITO
HORARIO DISPAROS (hora oficial)	12:00/13:00/14:00
MODO DISPARO	UN FOTOGRAMA
SOPORTE ENERGÍA	2 BATERÍAS EXTERNAS
RECARGA	PANEL SOLAR orientación norte
DISTANCIA FOCAL DEL LENTE (ZOOM 18 mm-55 mm)	18 mm



Fig. 4.3.1.4.1-D. Fotograma capturado por la cámara Norte instalada en el frente del glaciar Tyndall.

El día 24 de octubre se realizó la tercera visita al glaciar Tyndall. al sector de las cámaras automáticas. Se comprobó su funcionamiento, se revisó la estructura de soporte, se descargaron los datos hasta ese periodo y se realizó un mantenimiento a las cámaras. En esta visita se apreció que la cámara Sur se había detenido el día 11 de julio a las 13:58 horas, y se procedió a su activación. El desplazamiento a la zona se realizó siguiendo la logística anterior, pero en esta visita se utilizó más tiempo en el mantenimiento y comprobación del funcionamiento de los equipos, por lo que se decidió pernoctar una noche en villa Serrano, para continuar el regreso al día siguiente. En las Figs. 4.3.1.4.1-E y F se muestran las cámaras Norte y Sur.



Fig. 4.3.1.4.1-E. Cámara fotográfica secuencial Glaciar Tyndall, cámara Norte.



Fig. 4.3.1.4.1-F. Cámara fotográfica secuencial glaciar Tyndall, cámara Sur.

En la Figs. 4.3.1.4.1-G y H se muestran fotogramas capturados con las cámaras Norte y Sur. Los datos descargados de las cámaras fotográficas se entregan en los anexos digitales.



Fig. 4.3.1.4.1-G. Fotograma capturado por la cámara Norte, el día 25 de octubre 2013 a las 13:01 horas.



Fig. 4.3.1.4.1-H. Fotograma capturado por la cámara Sur, el día 11 de julio 2013, a las 13:58 horas.

4.3.2. Velocidad de movimiento

Para el cálculo de velocidades en el glaciar Tyndall se emplearon las coordenadas de las balizas de la transecta Japonesa medidas el 8 de abril y el 10 de mayo de 2013, ver Tabla 4.3.2-A. Las velocidades calculadas varían entre 107,40 cm/día y 4,79 cm/día con un promedio de 55,13 cm/día.

Tabla 4.3.2-A. Coordenadas y velocidades de movimiento de las balizas. transecta Japonesa. glaciar Tyndall. entre el 8 de abril y el 10 de mayo de 2013. Borde 2 representa el borde NE del glaciar. Coordenadas expresadas en proyección UTM huso 18 sur. sistema geodésico WGS84. El azimut se refiere al norte geográfico.

BALIZA	8 ABRIL 2013		10 MAYO 2013		VELOCIDAD	AZIMUT
	UTM E (m)	UTM N (m)	UTM E (m)	UTM N (m)	cm/día	grado sexagesimal
BORDE2	618.773,53	4.334.678,58	618.789,32	4.334.635,03		
T2	618.478,44	4.334.480,26	618.479,90	4.334.480,74	4,79	72
T3	618.131,80	4.334.289,22	618.133,40	4.334.288,57	5,38	112
T4	617.797,80	4.334.114,28	617.799,94	4.334.111,67	10,57	141
T5	617.479,27	4.333.939,55	617.482,51	4.333.933,77	20,71	151
T6	617.163,73	4.333.759,48	617.168,95	4.333.749,14	36,20	153
T7	616.830,83	4.333.582,81	616.838,55	4.333.567,17	54,53	154
T8	616.490,88	4.333.406,13	616.501,60	4.333.384,64	75,06	153
T9	616.151,70	4.333.232,50	616.159,58	4.333.212,06	68,43	159
T10	615.824,21	4.333.039,93	615.837,35	4.333.015,17	87,59	152
T11	615.500,48	4.332.805,42	615.516,79	4.332.780,90	92,03	146
T12	615.148,58	4.332.658,01	615.169,87	4.332.634,59	98,91	138
T13	614.866,05	4.332.430,07	614.892,62	4.332.408,27	107,40	129

En la Fig. 4.3.2-A se presentan las velocidades calculadas en el glaciar Tyndall en la transecta Japonesa. Se observa que las mayores velocidades ocurren hacia el centro del glaciar y disminuyen hacia el borde NE. como es de esperar debido a la mayor fricción lateral y disminución del espesor en el borde del glaciar. En el borde del glaciar se observa asimismo un flujo en dirección este-noreste, hacia el así llamado "Lóbulo Zapata", donde existe una marcada pendiente en esa misma dirección.

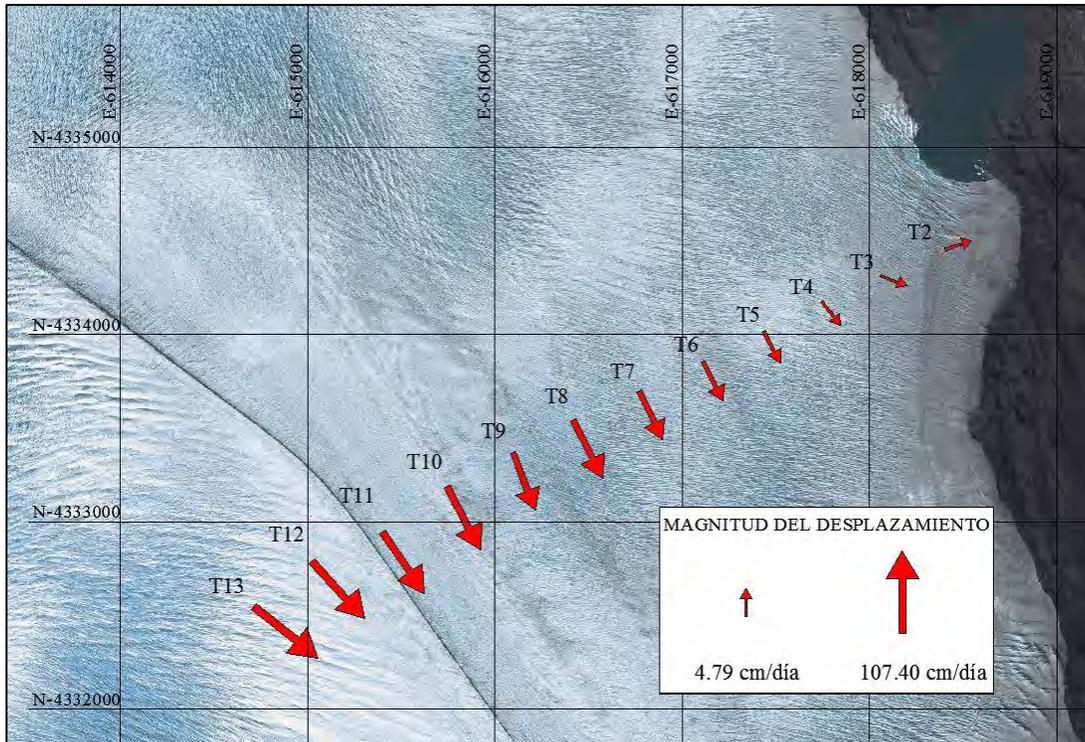


Fig. 4.3.2-A. Vectores de velocidad medidos en la superficie del glaciar Tyndall sobre la transecta Japonesa, entre el 8 de abril y el 10 de mayo de 2013. Fuente de la imagen: Google Earth.

También se calcularon las velocidades para las balizas de la transecta Raymond, ubicada en promedio unos 700 m glaciar arriba de la transecta Japonesa, medidas por la DGA el 17 de noviembre de 2002 y por Geoestudios el 10 de mayo de 2013, ver Tabla 4.3.2-B. Las velocidades calculadas varían entre 94,57 cm/día y 4,89 cm/día, con un promedio de 50,94 cm/día, muy similares a las velocidades estimadas en la transecta Japonesa, lo cual sugiere que las velocidades de principios de otoño (mes de abril) no varían sustancialmente de las velocidades estivales (periodo entre noviembre y mayo). Las velocidades ligeramente mayores del centro del glaciar (extremo suroeste) de la transecta Japonesa con respecto al extremo suroeste de la transecta Raymond de pueden atribuir a que las balizas de la transecta Raymond están instaladas en un sector más hacia el centro del glaciar (Fig. 4.3.2-B).

Tabla 4.3.2-B. Coordenadas y velocidades de movimiento de las balizas de la transecta Raymond. glaciar Tyndall. entre el 17 de noviembre de 2012 y el 10 de mayo de 2013. Coordenadas expresadas en proyección UTM huso 18 sur. sistema geodésico WGS84. El azimut se refiere al norte geográfico.

BALIZA	17 NOV. 2012		10 MAYO 2013		VELOCIDAD	AZIMUT
	UTM E (m)	UTM N (m)	UTM E (m)	UTM N (m)	cm/día	grado sexagesimal
B2	618.329,51	4.334.479,30	618.337,65	4.334.481,75	4,89	73
B3	617.933,37	4.334.339,62	617.944,20	4.334.334,10	6,98	117
B4	617.542,40	4.334.151,39	617.558,25	4.334.129,50	15,53	144
B5	617.186,61	4.333.908,66	617.212,00	4.333.857,70	32,72	154
B6	616.761,17	4.333.730,23	616.803,80	4.333.645,50	54,51	153
B7	616.385,07	4.333.585,83	616.442,55	4.333.466,85	75,94	174
B8	615.939,99	4.333.457,91	616.003,20	4.333.325,95	84,09	154
B9	615.468,01	4.333.297,06	615.547,60	4.333.163,80	89,20	149
B10	614.943,47	4.333.141,08	615.066,05	4.333.031,30	94,57	132

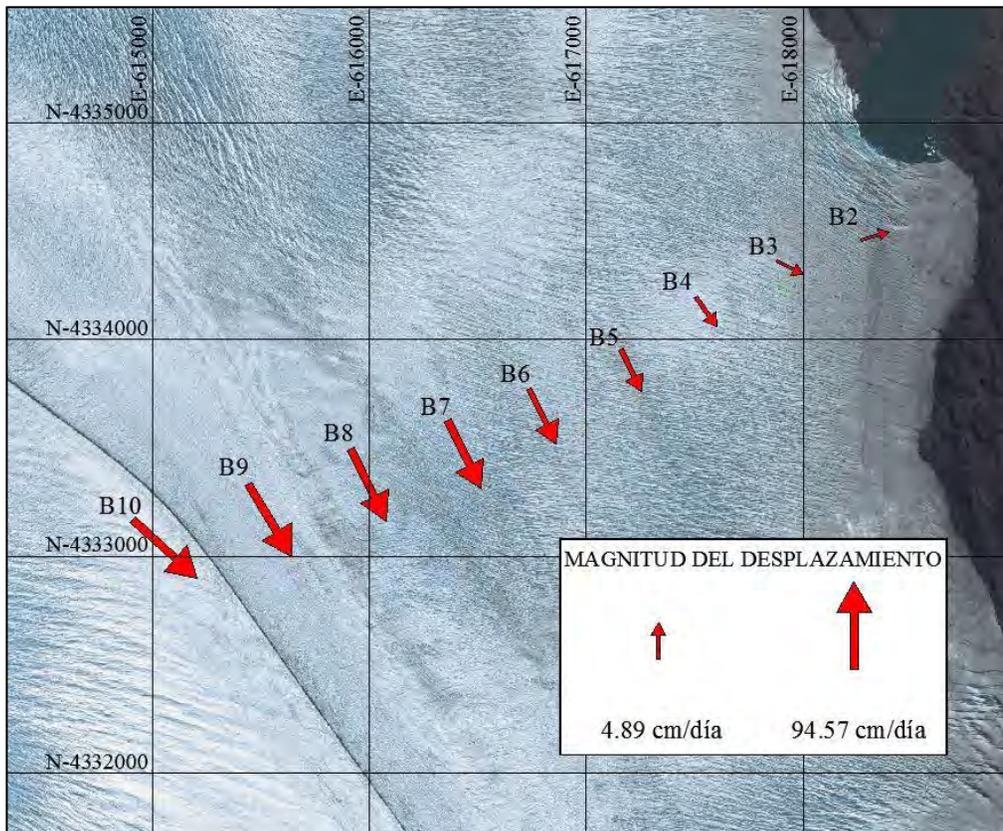


Fig. 4.3.2-B. Vectores de velocidad medidos en la superficie del glaciar Tyndall. sobre la transecta Raymond. entre el 17 de noviembre de 2012 y el 8 de mayo de 2013. Fuente de la imagen: Google Earth.

4.3.3. Meteorología

Para la caracterización meteorológica del glaciar Tyndall, se utilizaron los datos de la estación GEUS instalada por la DGA, con el objetivo de obtener información general de las condiciones meteorológicas en los glaciares y determinar el balance de energía superficial (SEB).

La estación meteorológica en el glaciar Tyndall sobre el hielo se ubica en las coordenadas UTM 18F 617.933 E y 4.334.340 m, a una altitud de 627 m s.n.m., en el lado nor-este del glaciar, ver Figs. 4.3.3-A y B. Fue instalada por la DGA en diciembre de 2012. El periodo de registro de datos obtenidos de la estación es del 19 de diciembre del 2012 al 22 de octubre de 2013.

La estación cuenta con los siguientes sensores:

- Radiación de onda corta incidente y reflejada
- Radiación de onda larga incidente y emitida
- Temperatura y humedad
- Presión atmosférica
- Temperatura aspirada
- Altura de hielo
- Dirección y velocidad del viento.

Fue visitada y se descargaron los datos el 7 de abril y posteriormente el 22 de octubre de 2013. En la visita del 7 de abril se identificó que la estación no estaba registrando radiación de onda corta incidente y altura de nieve, por lo que estos valores no se registraron correctamente y no se analizarán en el presente informe, además de encontrarse levemente inclinada y con el sensor de dirección del viento descalibrado. Posteriormente la DGA realizó una visita el 3 de octubre del 2013 donde arregló el sensor de dirección del viento. El 23 de noviembre del 2013 Geoestudios nuevamente visitó la estación y todos los sensores quedaron funcionando correctamente, además de instalar el sistema de transmisión satelital de datos Iridium, cuyos datos se adjuntan en los Anexos Digitales.



Fig. 4.3.3-A. Estación meteorológica en el glaciar Tyndall. Fuente de la imagen: Google Earth.



Fig. 4.3.3-B. Estación meteorológica en el glaciar Tyndall.

4.3.3.1. **Temperatura del aire**

La temperatura del aire promedio en la estación Tyndall durante el periodo fue de +2.3 °C, con un máximo de +12.2 °C y un mínimo de -13.4 °C. En la Fig. 4.3.3.1-A se presentan los datos horarios de temperatura del aire y temperatura aspirada en la estación Tyndall, donde se observa que ambas temperaturas tienen valores similares. Las temperaturas se mantienen positivas la mayor parte del tiempo durante la temporada estival hasta comienzos de mayo y posteriormente comienzan a disminuir en invierno, presentándose los menores valores en el mes de septiembre.

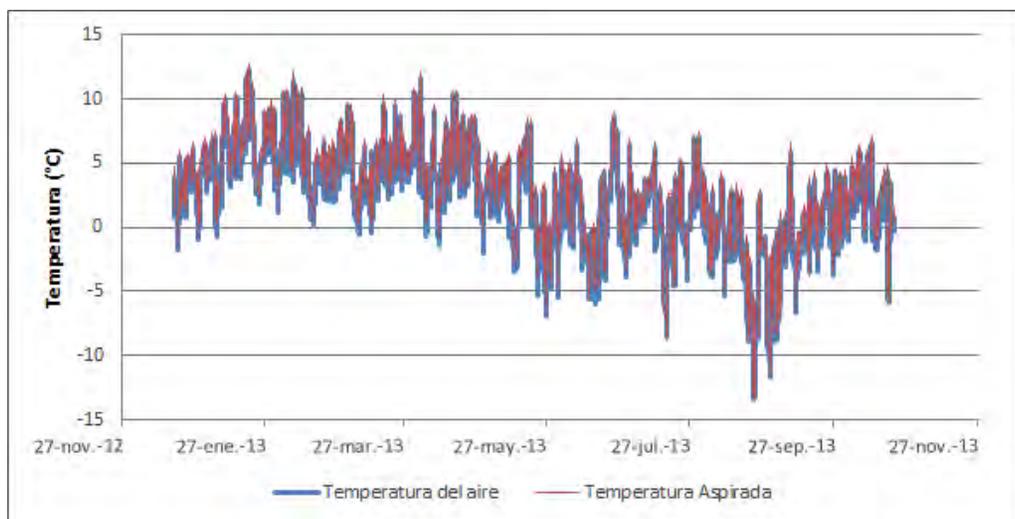


Fig. 4.3.3.1-A. Temperatura del aire promedio hora sensor sin aspirado y sensor aspirado en la estación Tyndall.

4.3.3.2. **Humedad relativa**

La humedad relativa promedio en el periodo de registro fue de 75%, con un máximo de 99% y un mínimo de 25%. En la Fig. 4.3.3.2-A se presentan los datos horarios de la humedad relativa en la estación Tyndall. Se observa que la humedad es muy alta en la zona, encontrándose la mayor parte del tiempo sobre el 60%.

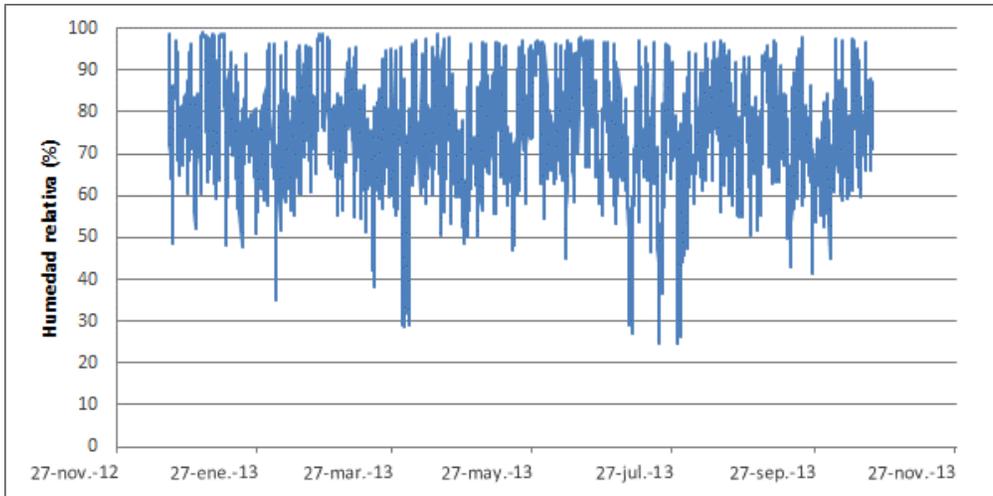


Fig. 4.3.3.2-A. Humedad relativa promedio hora en la estación Tyndall.

4.3.3.3. ***Presión atmosférica***

La presión atmosférica promedio en la estación Tyndall fue de 940 mb, con un máximo de 968 mb y un mínimo de 909 mb. En la Fig. 4.3.3.3-A se presentan los datos horarios de presión atmosférica en la estación Tyndall.

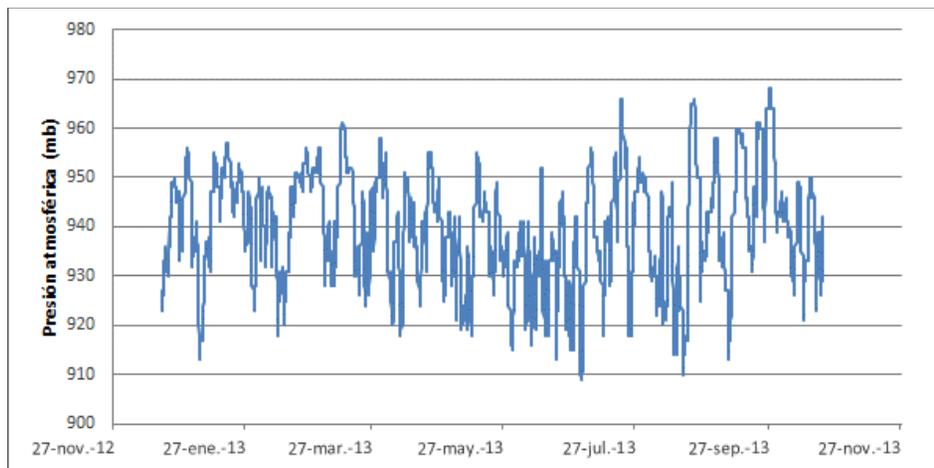


Fig. 4.3.3.3-A. Presión atmosférica promedio hora en la estación Tyndall.

4.3.3.4. **Velocidad y dirección del viento**

La velocidad del viento promedio en la estación Tyndall fue de 5,6 m/s. con un máximo de 21,2 m/s. En la Fig. 4.3.3.4-A se presentan los datos horarios de velocidad del viento, donde se observa que la velocidad del viento se mantiene generalmente bajo los 15 m/s salvo en periodos de inestabilidad.

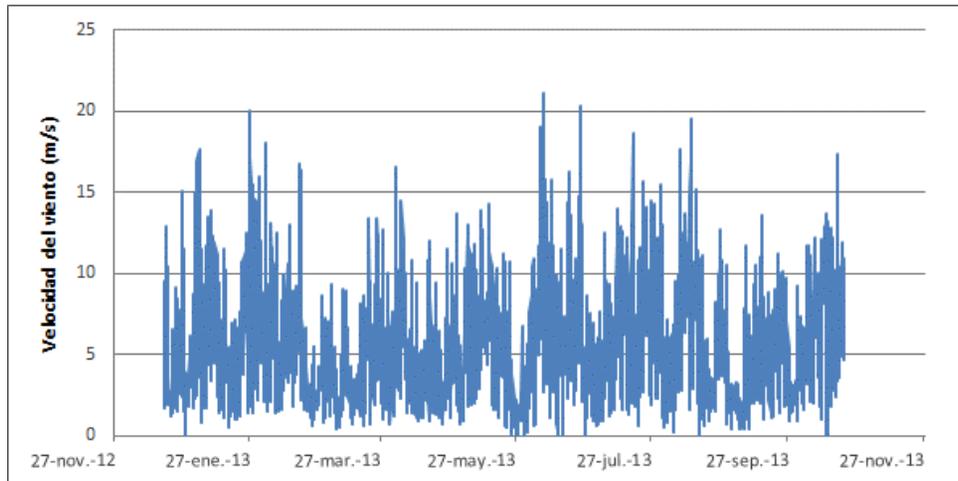


Fig. 4.3.3.4-A. Velocidad del viento promedio hora en la estación Tyndall.

En la Fig. 4.3.3.4-B se presenta la rosa de los vientos de la estación Tyndall para los valores registrados entre el 3 y el 22 de octubre de 2013, ya que en el resto del período monitoreado no se registró correctamente la dirección del viento.

En la Fig. 4.3.3.4-B se presenta la rosa de los vientos de la estación Tyndall en el periodo registrado, y en la Fig. 4.3.3.4-C se presenta la rosa de los vientos sobre una imagen satelital con la ubicación de la estación. Se observa que la dirección del viento es homogénea, con vientos predominantes del oeste-suroeste (OSO), que provienen de la meseta del CHPS.

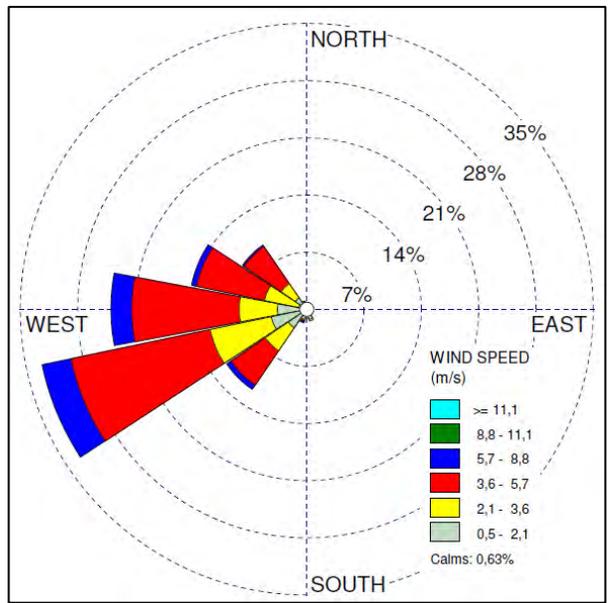


Fig. 4.3.3.4-B. Rosa de los vientos estación Tyndall.

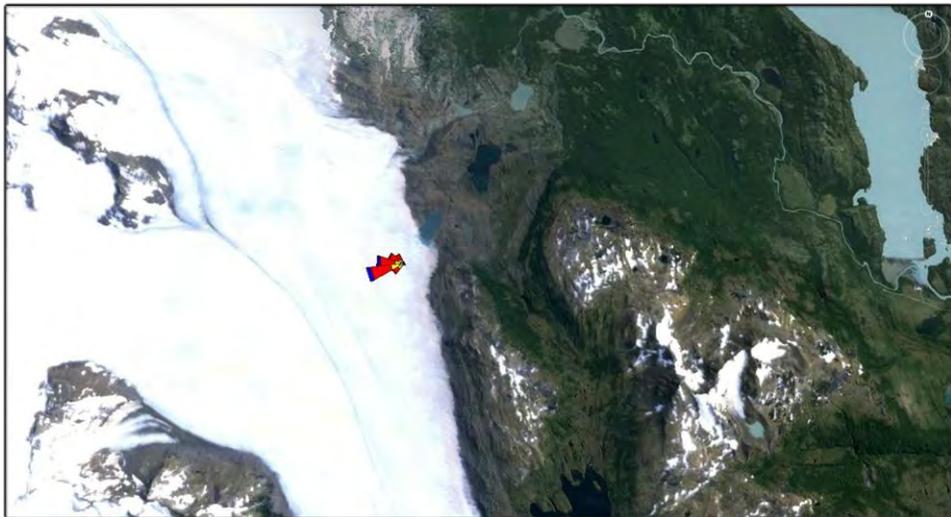


Fig. 4.3.3.4-C. Rosa de los vientos en la estación Tyndall. Fuente de la imagen: Google Earth.

4.3.3.5. **Altura de nieve**

No se analizan los datos registrados con el sensor de altura de nieve ya que durante el periodo de acumulación el sensor registró valores fuera de rango y durante el periodo de

ablación los valores registrados no representan la altura del hielo debido a que el sensor se encuentra unido a la estación meteorológica Tyndall con trípode de tipo GEUS que desciende con la superficie de hielo.

4.3.3.6. **Radiación de onda corta**

La radiación de onda corta reflejada promedio en la estación Tyndall fue de 89 W/m^2 , con un máximo de 1.049 W/m^2 . En la Fig. 4.3.3.6-A se presentan los datos horarios de radiación de onda corta reflejada. Se observa que existen algunos días con valores máximos muy por sobre los máximos de la época, Estos datos son inesperados y podrían estar indicando problemas en el sensor, por lo que se deben considerar con precaución.

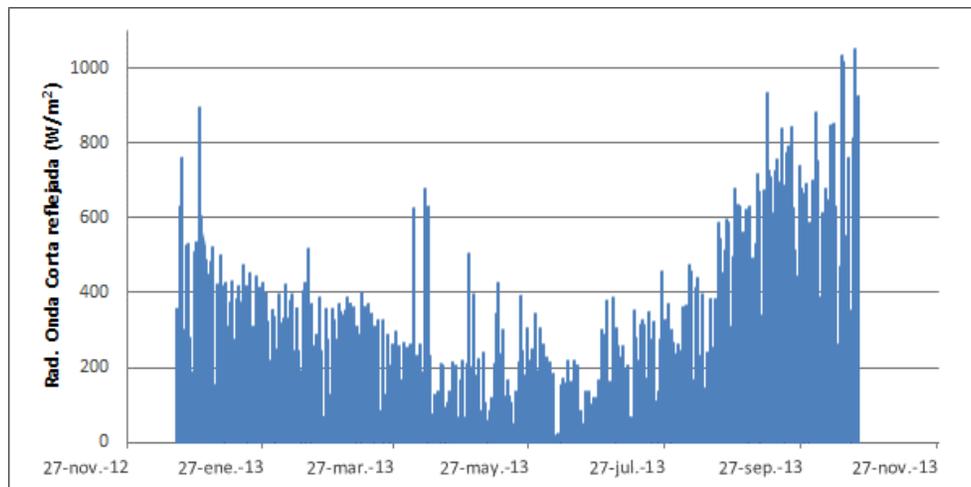


Fig. 4.3.3.6-A. Radiación de onda corta reflejada promedio hora en la estación Tyndall.

4.3.3.7. **Radiación de onda larga**

La radiación de onda larga incidente promedio fue de 307 W/m^2 , con un máximo de 375 W/m^2 y un mínimo de 201 W/m^2 . La radiación de onda larga emitida promedio fue de 324 W/m^2 , con un máximo de 352 W/m^2 y un mínimo de 242 W/m^2 . El balance de radiación de onda larga es muy cercano a cero, es decir que la energía incidente es muy similar a la energía emitida por la superficie, por lo que en el balance general la radiación de onda larga prácticamente no aporta ni resta energía.

En la Fig. 4.3.3.7-A se presentan los datos horarios de radiación de onda larga incidente y emitida en la estación Tyndall. Se observa que la radiación de onda larga incidente tiene una variación de amplitud mucho mayor a la radiación emitida, debido a que la radiación de onda larga es proporcional a la temperatura y la atmósfera sufre mayores cambios de temperatura y composición que la superficie de hielo.

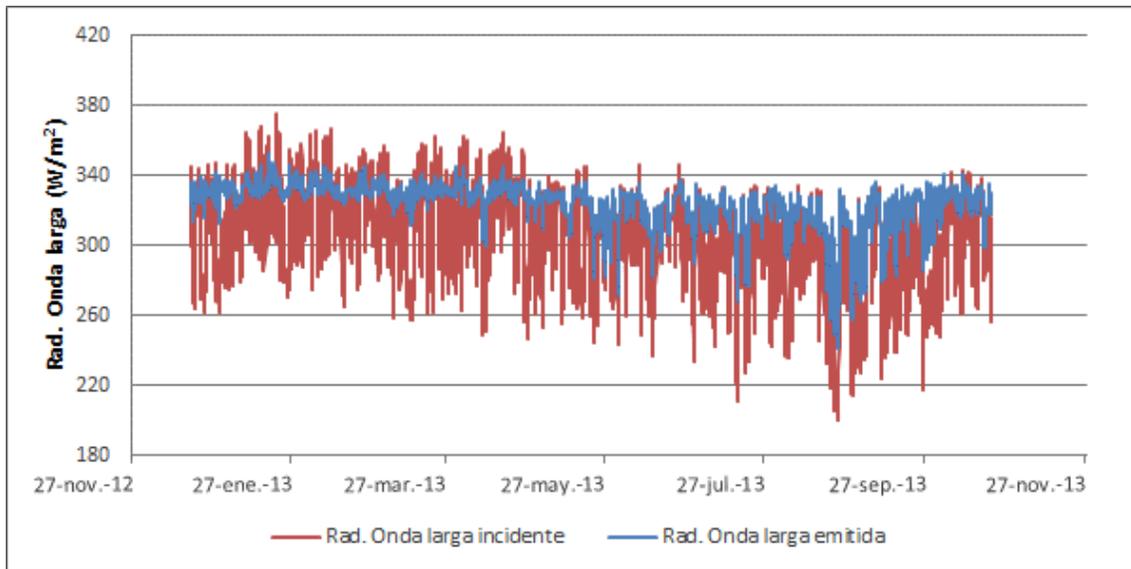


Fig. 4.3.3.7-A. Radiación de onda larga incidente y emitida promedio hora en la estación Tyndall.

4.3.4. Fluviometría

Los datos fluviométricos disponibles en la cuenca del río Serrano, subcuenca del glaciar Tyndall, corresponden a los datos de las estaciones fluviométricas Tyndall, Geikie y Cañadón 1. Estas estaciones cuentan con datos de caudal diarios, entregados por la DGA, cuyas coordenadas de ubicación y periodo de registro de datos se presentan en la Tabla 4.3.4-A. En la Fig. 4.3.4-A se presenta su ubicación.

Para efectos de análisis comparativo de precipitaciones en la zona se utiliza el registro de la estación meteorológica Glaciar Tyndall Roca (Vaisala) que se encuentra ubicada en el margen lateral de este glaciar. y su periodo de registro utilizado es entre el 1 de enero de

2012 y el 7 de octubre de 2012.

Tabla 4.3.4-A. Datos de las estaciones fluviométricas de la subcuenca glaciar Tyndall. Coordenadas expresadas en proyección UTM huso 18 S, sistema geodésico WGS84.

Estación	UTM E (m)	UTM N (m)	Fecha inicio	Fecha fin
Tyndall	628.671	4.319.931	19-07-2011	05-10-2012
Geikie	624.962	4.314.954	21-07-2011	06-10-2012
Cañadón 1	620.228	4.313.862	17-10-2009	07-10-2012

Nota:

La estación Tyndall se encuentra en el río Tyndall que desagua del lago Tyndall. El lago Tyndall era hasta hace pocos años un lago proglaciar pero en la última década el lago se desconectó del hielo producto del retroceso del glaciar. En la Fig. 4.3.4-B se presenta una imagen de la zona del borde del glaciar y el lago Tyndall donde se observa la separación de aproximadamente 270 m entre el lago y el borde del hielo.

La estación fluviométrica Geikie se ubica en el río Geikie, el cauce de desagüe del lago Geikie, que constituye el lago proglaciar del glaciar Tyndall.

La estación Cañadón 1 se ubica en un cauce innominado, afluente del lago Geikie en su sector sur occidental, que capta las aguas de un valle ubicado entre el glaciar Balmaceda por el sur y el glaciar Tyndall por el norte.

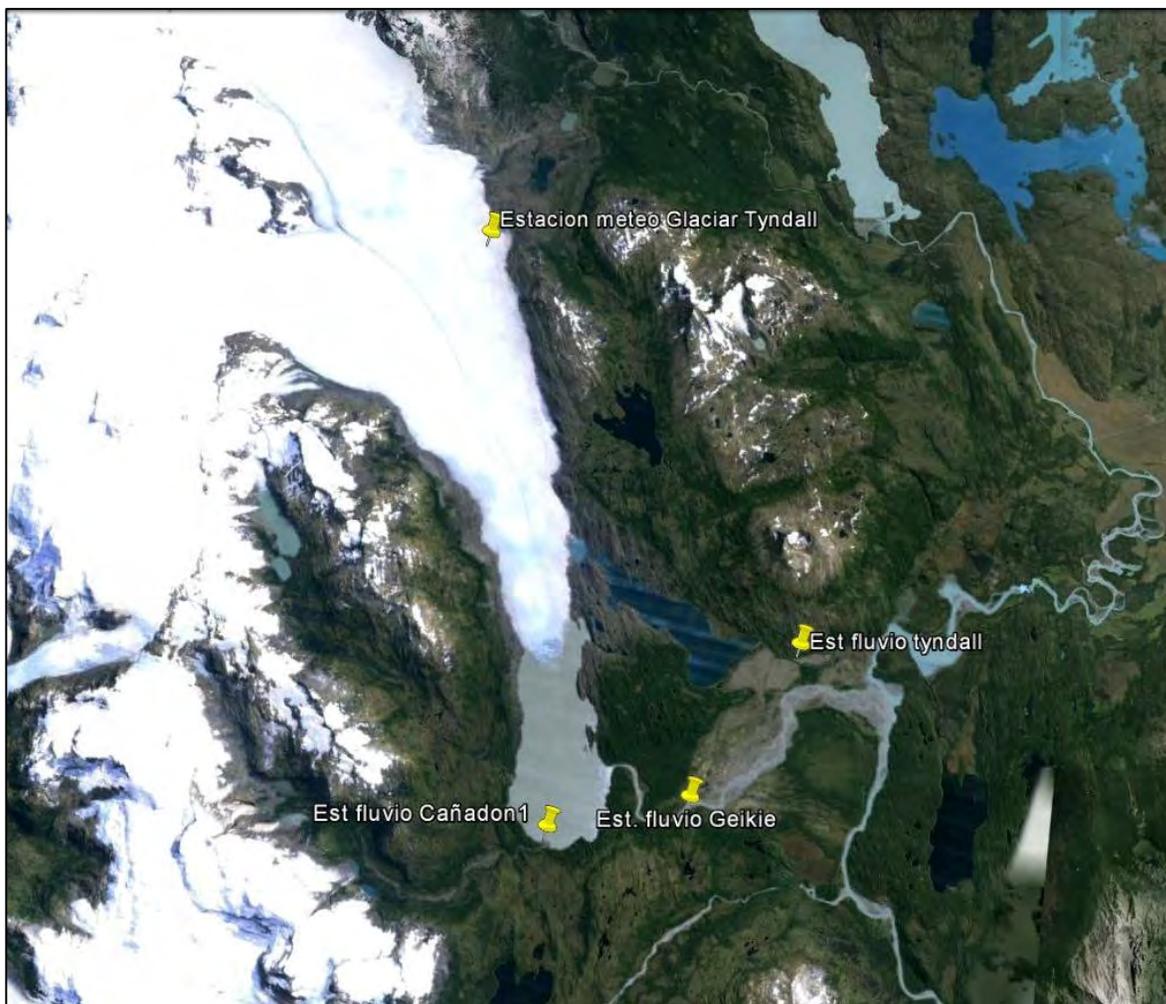


Fig. 4.3.4-A. Estaciones fluviométricas en la zona del glaciar Tyndall. Fuente de la imagen: Google Earth.



Fig. 4.3.4-B. Zona entre el glaciar y el lago Tyndall. Fuente: satélite Word View 2. 25 de febrero de 2012.

En la Fig. 4.3.4-C se presentan los datos de caudal promedio diario y mensual en la estación Tyndall y la precipitación diaria registrada en la estación Glaciar Tyndall. Los datos de caudal promedio diario varían entre $3,5 \text{ m}^3/\text{s}$ y $5,4 \text{ m}^3/\text{s}$. Se observa que el caudal en la estación Tyndall no presenta un ciclo anual definido, con máximos diarios y mensuales en abril y agosto. Los máximos caudales diarios ocurren en los eventos de precipitación (Fig. 4.3.4-C), demostrando que el régimen de este río es principalmente pluvial.

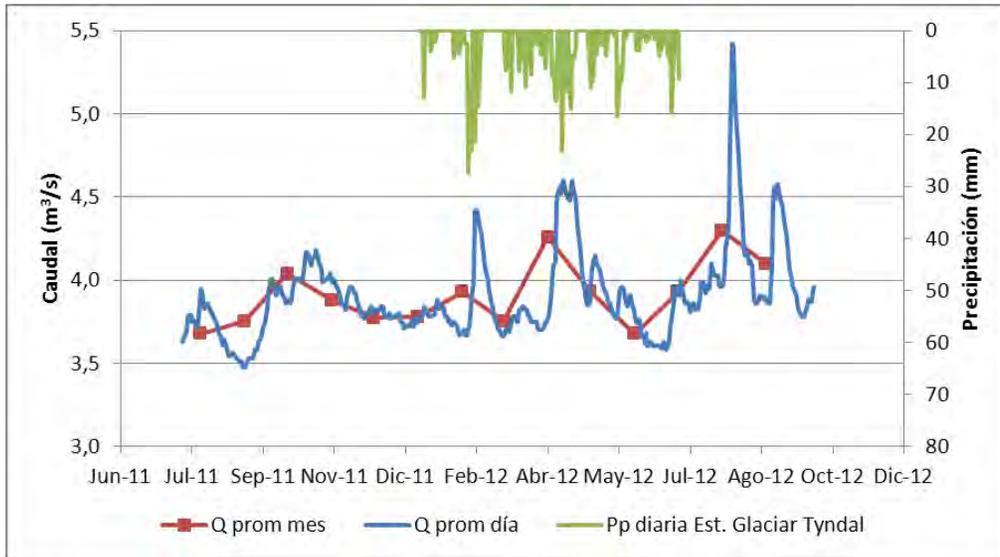


Fig. 4.3.4-C. Caudal estación fluviométrica Tyndall.

En la Fig. 4.3.4-D se presentan los datos de caudal promedio diario y mensual en la estación Geikie y la precipitación diaria registrada en la estación Glaciar Tyndall. Los datos de caudal promedio diario varían entre 561,0 (m³/s) y 12,7 (m³/s). Se observa que el caudal en la estación Geikie presenta un ciclo anual con máximo mensual en diciembre, con un régimen glacio-nival con mayores caudales entre noviembre y abril en la época de mayor ablación. En esta estación los máximos diarios no están directamente relacionados a las precipitaciones ya que los caudales provienen principalmente del derretimiento del glaciar y el manto nival.

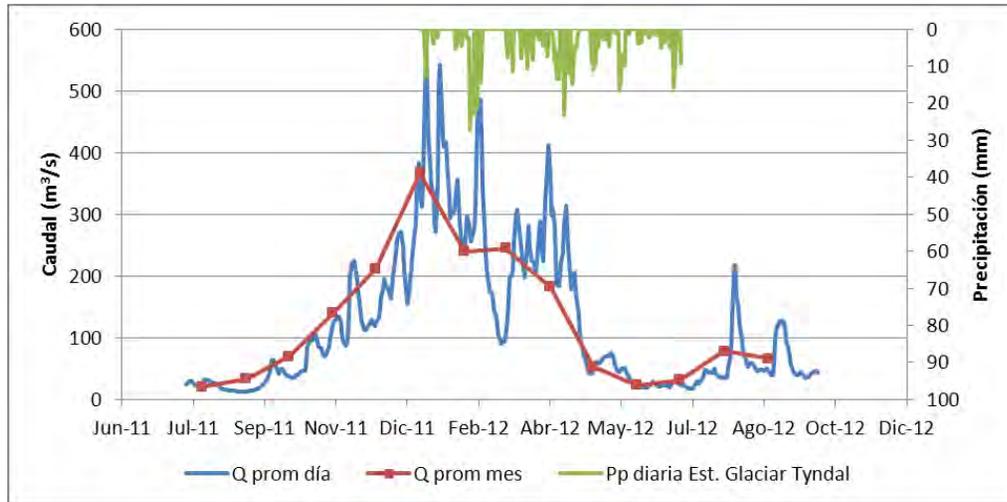


Fig. 4.3.4-D. Caudal estación fluviométrica Geikie.

En la Fig. 4.3.4-E se presentan los datos de caudal promedio diario y mensual en la estación Cañadón 1 y la precipitación diaria registrada en la estación Glaciar Tyndall. Los datos de caudal promedio diario varían entre $61,0 m^3/s$ y $1,8 m^3/s$. Se observa que el caudal en la estación Cañadón 1 presenta un ciclo anual con máximos mensuales entre enero y marzo, con un régimen glacio-nival con mayores caudales entre noviembre y abril en la época de mayor ablación y derretimiento de nieve y hielo. En la estación Cañadón 1 los máximos diarios están relacionados con la precipitación, sin embargo el caudal principal proviene del derretimiento del glaciar Balmaceda y del manto de nieve de los cordones montañosos en la cuenca del curso de agua.

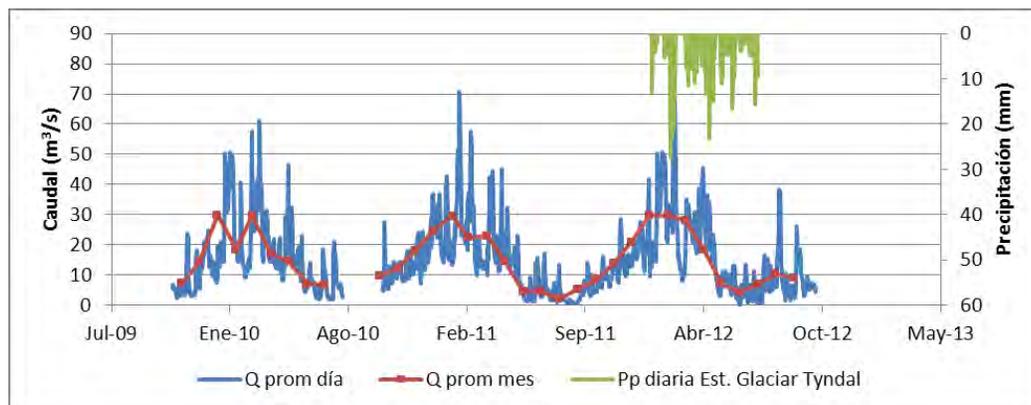


Fig. 4.3.4-E. Caudal estación fluviométrica Cañadón 1.

4.3.5. Balances

4.3.5.1. Balance glaciológico

Las fechas de registro de altura de las 12 balizas en la transecta Japonesa del glaciar Tyndall son el 8 abril, fecha de instalación y primer control, y el 10 de mayo que corresponde al segundo control. En la segunda campaña de medición de balizas se midieron las balizas de la transecta Raymond, instaladas por la DGA el 17 de noviembre de 2012.

La estimación de la masa perdida en el periodo registrado se calcula restando la altura de las balizas sobre la superficie, en las dos fechas controladas. Luego, para calcular el equivalente en agua se multiplica la diferencia de alturas por la densidad. En la fecha de medición de las balizas entre el 15 de abril y el 10 de mayo se observó en terreno que la superficie de los glaciares donde se instalaron las balizas correspondía a hielo por lo que el cálculo de masa se realizó con una densidad igual a $0,9 \text{ gr/cm}^3$.

La ablación promedio estimada en la transecta Japonesa en el glaciar Tyndall entre el 8 de abril y el 10 de mayo de 2013 es de 82 cm eq.a. con una tasa promedio de 2.5 cm eq.a./día. La ablación promedio estimada en la transecta Raymond entre el 17 de noviembre del 2012 y el 10 de mayo de 2013 fue de 581 cm eq.a. con una tasa promedio de ablación igual a 3,3 cm eq.a./día.

Ambas tasas de ablación son bastante similares a pesar de la diferencia de los periodos, abril y noviembre-mayo, esto se debe a que en esta zona la ablación se debe principalmente a al aporte de energía del calor sensible por la temperatura del aire y por el aporte de calor de la precipitación, que son más uniformes durante el verano que la energía aportada por la radiación de onda corta. En las Tablas 4.3.5.1-A y B se presentan los datos de ablación en cada baliza en la transectas Japonesa y Raymond, respectivamente.

Tabla 4.3.5.1-A. Datos de ablación en las balizas de la transecta Japonesa, glaciar Tyndall.

Baliza	Fecha instalación	Fecha control	Cant. de días	Dif. (cm)	Ablación (cm eq.a.)	Tasa ablación (cm eq.a./día)
T1	08-04-2013	10-05-2013	32			
T2	08-04-2013	10-05-2013	32	76	68	2,1
T3	08-04-2013	10-05-2013	32	76	68	2,1
T4	08-04-2013	10-05-2013	32	76	68	2,1
T5	08-04-2013	10-05-2013	32	85	77	2,4
T6	08-04-2013	10-05-2013	32	79	71	2,2
T7	08-04-2013	10-05-2013	32	89	80	2,5
T8	08-04-2013	10-05-2013	32	85	77	2,4
T9	08-04-2013	10-05-2013	32	125	113	3,5
T10	08-04-2013	10-05-2013	32	130	117	3,7
T11	08-04-2013	10-05-2013	32	92	83	2,6
T12	08-04-2013	10-05-2013	32	76	68	2,1
T13	08-04-2013	10-05-2013	32	98	88	2,8
Promedio					82	2,5

Tabla 4.3.5.1-B. Datos de ablación en la transecta Raymond, glaciar Tyndall.

Baliza	Fecha instalación	Fecha control	Cant. de días	Dif. (cm)	Ablación (cm eq.a.)	Tasa ablación (cm eq.a./día)
B02	17-11-2012	10-05-2013	174	690	621	3,6
B03	17-11-2012	10-05-2013	174	672	605	3,5
B04	17-11-2012	10-05-2013	174	657	591	3,4
B05	17-11-2012	10-05-2013	174	666	599	3,4
B06	17-11-2012	10-05-2013	174	556	500	2,9
B07	17-11-2012	10-05-2013	174	782	704	4,0
B08	17-11-2012	10-05-2013	174	607	546	3,1
B09	17-11-2012	10-05-2013	174	581	523	3,0
B10	17-11-2012	10-05-2013	174	595	536	3,1
Promedio					581	3,3

4.3.5.2. **Balance de energía**

El balance de energía se realizó en el glaciar Tyndall en el punto de la estación meteorológica sobre el hielo en el periodo en que se cuenta con los datos necesarios para la estimación de los flujos de energía. El periodo es entre el 20 de diciembre 2012 y el 21 de octubre del 2013.

Los datos meteorológicos utilizados de la estación glaciar Tyndall sobre el hielo corresponden a la temperatura del aire, humedad relativa, presión atmosférica, velocidad del viento, radiación de onda corta reflejada y radiación de onda larga incidente y emitida. Todos los datos se registraron a 2 m del suelo y se presentaron en la Sección 4.3.3. La precipitación se estimó a partir de los datos registrados en la estación Torres del Paine coordenadas UTM H18 641.853 E y 4.327.393 S, en el valle del río Grey a una altitud aproximada de 50 m s.n.m. Para estimar los datos de precipitación en el punto de la estación Tyndall se utilizó el gradiente de precipitación en función de la altitud calculado en el estudio hidrológico en la cuenca del Río Grey realizado por Geoestudios (1991-1992) igual a 2 entre la altitud de la estación Torres del Paine y la estación sobre el glaciar Tyndall. La precipitación horaria estimada en el periodo de análisis se presenta en la Fig. 4.3.5.2-A, donde la precipitación total en el periodo es igual a 1.338 mm. Para la radiación de onda corta incidente se utilizan los datos registrados en la estación Glaciar Tyndall Roca (Vaisala) que se encuentra ubicada en el margen lateral de este glaciar a 2 km aproximadamente de la estación glaciar Tyndall sobre el hielo, ver Fig.4.3.5.2-B. En la Fig. 4.3.5.2-C se presentan los datos horarios de radiación de onda corta incidente y reflejada utilizadas en el balance de energía, donde se eliminaron los datos de radiación solar reflejada mayores a la radiación solar incidente. El periodo comprendido entre el 1 de junio y 7 de julio no cuenta con datos de radiación incidente por lo que en este periodo no se estimará el balance de energía. El albedo calculado de los datos de radiación de onda corta se presenta en la Fig. 4.3.5.2-D. y su promedio es igual a 0,4. Este valor de albedo es un promedio entre el albedo de la neviza y el hielo (Cuffey y Paterson, 2010) que coincide con la situación de la superficie en el lugar de la estación meteorológica en el periodo de análisis.

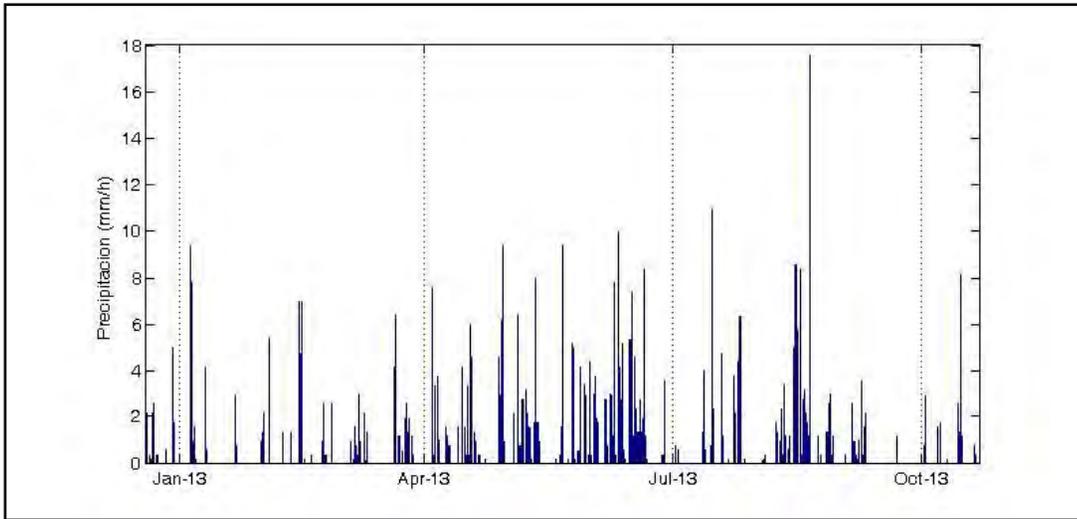


Fig. 4.3.5.2-A. Precipitación estimada en la estación glaciaria Tyndall sobre el hielo.



Fig. 4.3.5.2-B. Ubicación estaciones meteorológicas glaciaria Tyndall sobre el hielo y glaciaria Tyndall Roca.

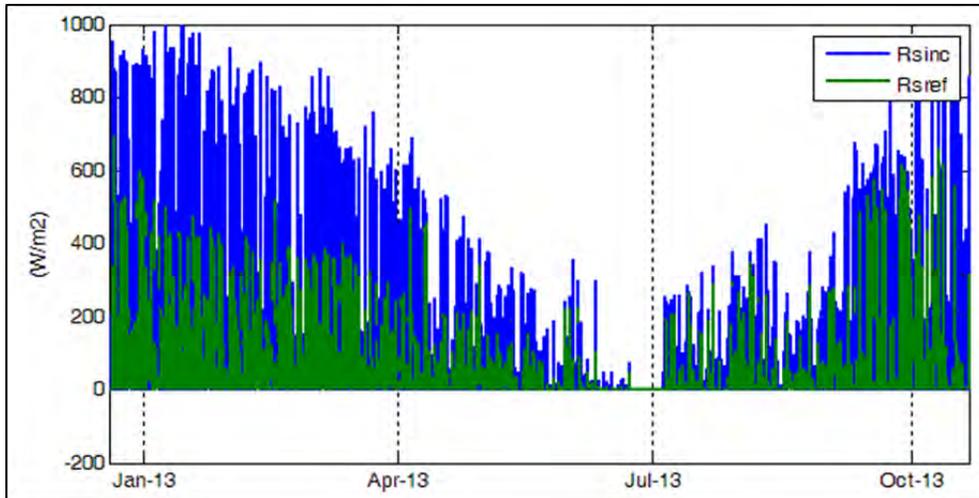


Fig. 4.3.5.2-C. Radiación de onda corta incidente registrada en la estación glaciaria Tyndall Roca y radiación de onda corta refleja registrada en la estación glaciaria Tyndall en hielo.

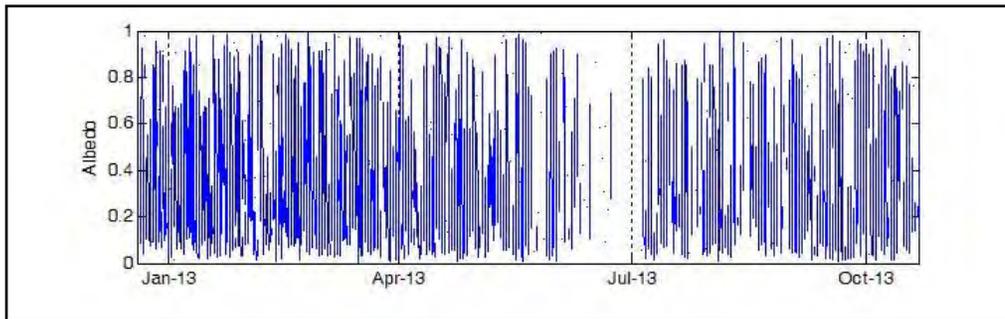


Fig. 4.3.5.2-D. Albedo promedio horario en la estación glaciaria Tyndall sobre el hielo.

La metodología utilizada para la estimación del balance de energía en el glaciar Tyndall sobre el hielo es igual a la utilizada en el glaciar Exploradores explicada en el subcapítulo 4.2.5.2.

Para la estimación de los flujos turbulentos se utilizó el parámetro Z_0 igual a 0,0001 m entre diciembre 2012 y fin de marzo 2013 que corresponde al valor de la neviza-hielo y 0,001 m entre abril y octubre, valor mínimo en el rango de la rugosidad del hielo (Cuffey y Paterson, 2010). Para los parámetros Z_{0m} y Z_{0t} se utiliza la aproximación sugerida por Cuffey y Paterson (2010) donde ambos parámetros se estiman igual a $0,01 * z_0$.

Los resultados promedios del balance indicados en la Tabla 4.3.5.2-A y Fig. 4.3.5.2-E muestran que la radiación neta de onda corta es máxima en verano y mínima en invierno como es de esperar según el ciclo anual de la radiación de onda corta incidente. El flujo de calor sensible es mayor y positivo en verano y mínimo y negativo en invierno siguiendo la tendencia de la temperatura del aire. El calor latente no tiene una mayor variación durante el año a excepción de agosto cuando ocurre condensación. La radiación neta de onda larga es siempre negativa, con un mayor valor absoluto en verano asociado a menor nubosidad.

En los meses de mayor ablación, enero y febrero, la principal entrada de energía es la radiación de onda corta neta (RS_{net}) que corresponde a un 68% de la entrada total de energía. Tabla 4.3.5.2-A y Fig. 4.3.5.2-E. La entrada de energía a través del calor sensible (Q_s) representa un 32%. El aporte de energía por la precipitación (Q_p) es depreciable debido a que el monto de precipitación no es suficiente para aportar un monto de energía considerable a la superficie. La pérdida de energía por radiación de onda larga neta (RL_{net}) es pequeña y varía entre un 5% y 7%. La pérdida de energía por el flujo de calor latente (Q_L) varía entre un 24% y 27% de la energía disponible para la ablación, mucho menor a la energía disponible para la fusión (Q_M). Esto se debe a que la humedad relativa es alta (promedio en el periodo igual a 77%) y por lo tanto la diferencia entre la presión de vapor es pequeña.

En la Fig. 4.3.5.2-F se presentan los flujos de energía promedio horarios, donde se observan los ciclos diarios y anuales de todos los flujos.

Tabla 4.2.5.2-A. Flujos de energía promedio.

fecha	QM (W/m ²)	Rsnet (W/m ²)	Rlnet (W/m ²)	QL (W/m ²)	QS (W/m ²)	QP (W/m ²)
20-31 dic	80,6	104,2	-20,6	-23,0	20,1	0,0
ene	113,7	108,7	-10,9	-36,0	51,9	0,0
feb	87,5	86,3	-6,6	-32,8	40,5	0,0
mar	57,6	74,4	-17,9	-28,4	29,5	0,0
abr	27,7	41,3	-12,1	-52,3	50,8	0,0
may	0,0	18,2	-15,1	-30,5	27,5	0,0
jun	-	-	-	-	-	-
7-31 jul	1,6	20,5	-24,5	-16,3	22,0	0,0
ago	0,3	27,9	-23,1	4,7	-9,2	0,0
sep	18,2	74,8	-29,9	-32,7	6,1	0,0
1-21 oct	24,0	63,0	-15,3	-53,7	30,0	0,0

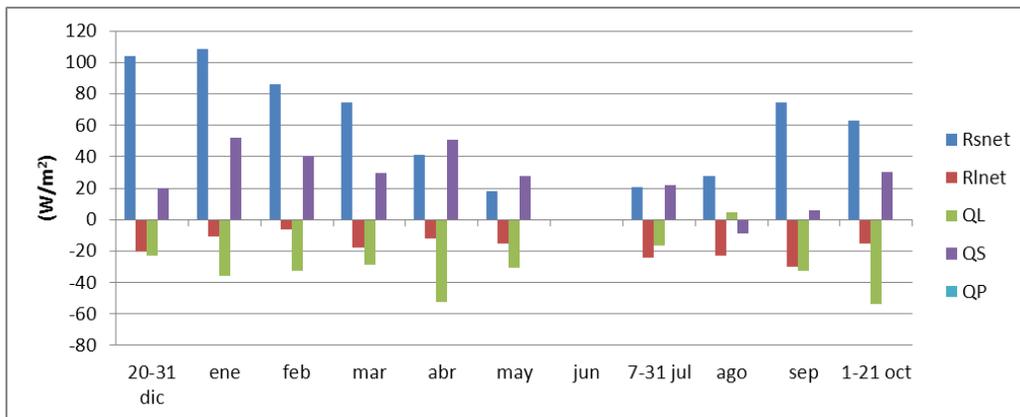


Fig. 4.3.5.2-E. Flujos de energía promedio mensual.

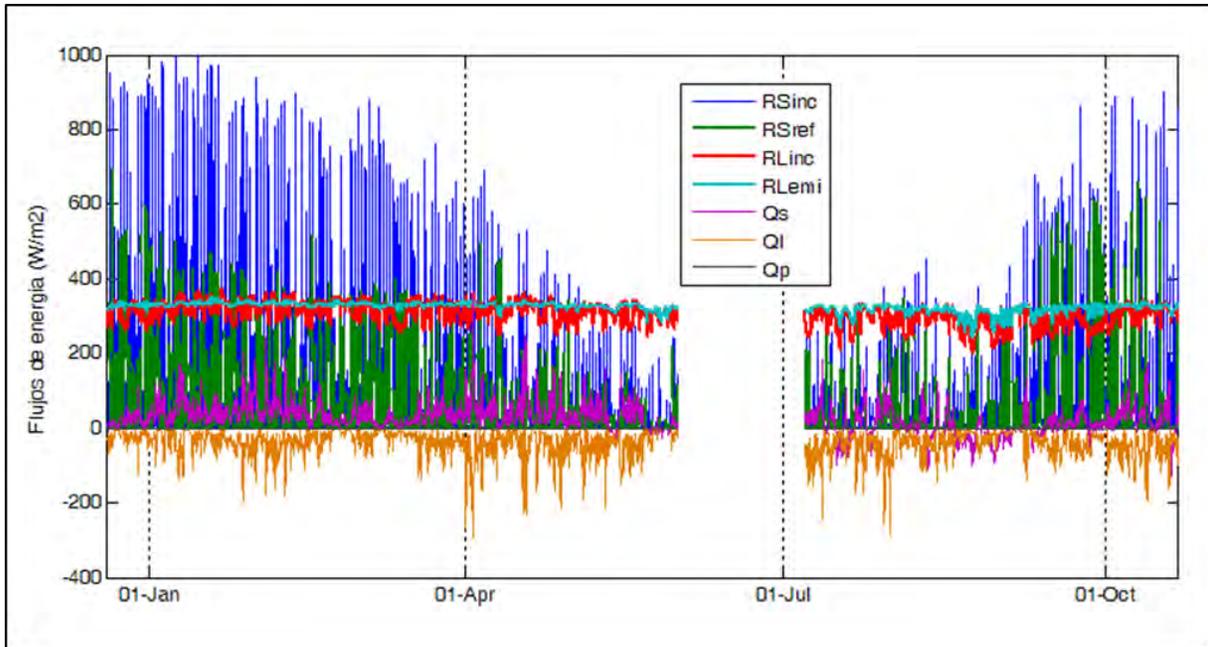


Fig. 4.3.5.2-F. Flujos de energía promedios hora.

La ablación se estima con el flujo de calor latente y la energía disponible para la fusión siguiendo la misma metodología explicada en el punto 2.5.3.1. Para la densidad se ocupó un valor de $0,9 \text{ gr/cm}^3$ que corresponde a la densidad del hielo. En la Tabla 4.3.5.2-B se presenta la sublimación y fusión estimada en cada mes. Se observa que ocurre ablación todos los meses excepto agosto debido a la baja radiación y al flujo de calor sensible negativo. Los meses con mayor ablación son enero y febrero cuando la radiación es mayor.

La ablación medida en las balizas es de 82 cm eq.a. entre el 8 de abril y el 10 de mayo del 2013, mayor a la ablación estimada en el balance de energía en el mismo periodo correspondiente a 41 cm eq.a. Esta diferencia se puede deber a discrepancias al utilizar la radiación de onda corta incidente medida en otro punto y a que los parámetros del balance de energía no están validados ya que no se cuenta con suficientes datos de ablación, por lo que la estimación del balance de energía es solo referencial y debe ser utilizada con precaución.

Tabla 4.3.5.2-B. Ablación estimada con el balance de energía.

fecha	Sublimación	Fusión	Ablación
	cm eq.a.	cm eq.a.	cm eq.a.
20-31 dic	0,9	25	26
ene	3,8	101	105
feb	3,1	70	74
mar	3,0	51	54
abr	5,3	24	29
may	3,2	0	3
jun			
7-31 jul	1,7	1	3
ago	0,0	0	0
sep	3,3	16	19
1-21 oct	3,8	15	18

5. CAPACITACIONES

5.1. IRIDIUM

El día 7 de Noviembre se realizó un taller de capacitación para el personal de la Unidad de Nieves y Glaciares de la Dirección General de Aguas, con motivo de la implementación del sistema de transmisión satelital de datos, en las estaciones meteorológicas automáticas tipo GEUS que se utilizan en los glaciares.

Se llevó a cabo en las dependencias de Geoestudios, impartidos por (Gabriela Collao y Andrés Marangunic) con la participación de las siguientes personas de la DGA:

- Armando Peña Gonzalez
- Jorge Huenante Gutierrez
- David Farías Barahona
- Diego Gonzalez Pavez
- Alexis Segovia Rocha
- Yerin Carvajal Morales.

Se trataron los distintos aspectos que involucra esta implementación, que se describen a continuación: características generales del sistema, costo de la transmisión, consumo de energía, programación, codificación binaria, recuperación de datos, instalación del sistema en las estaciones. Ver Fig. 5.1-A.

El material de trabajo para el taller “Transmisión de Datos Vía Satélite” se encuentra en los Anexos Digitales. Más detalles al respecto se encuentran en el capítulo 6. “CARACTERISTICAS Y DETALLES PARA LA IMPLEMENTACIÓN Y OPERACIÓN DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN SATELITAL DE DATOS”.



Fig. 5.1-A. Presentación del sistema de transmisión satelital en dependencias de Geostudios. Fuente: DGA.

5.2. ZONIFICACIÓN DE RIESGOS Y MODELACIÓN DE LAHARES

El día 6 de Noviembre se realizó un taller de capacitación para el personal de la UGN de la DGA, cuyo objetivo fue la zonificación de riesgos de lahares asociados a la presencia glaciares mediante modelación con Laharz y/o MSF.

La capacitación se llevó a cabo en las dependencias de UGN (Figs. 5.2-A y B), impartidos por (José Becerra y Martín Bustamante) con la participación de las siguientes personas:

- Armando Peña Gonzalez (DGA)
- Jorge Huenante Gutierrez (DGA)
- David Farías Barahona (DGA)
- Diego Gonzalez Pavez (DGA)
- Alexis Segovia Rocha (DGA)
- Fernando Gimeno Molina (U. de Chile).



Fig. 5.2-A. Taller de zonificación de riesgo y modelación de lahares.

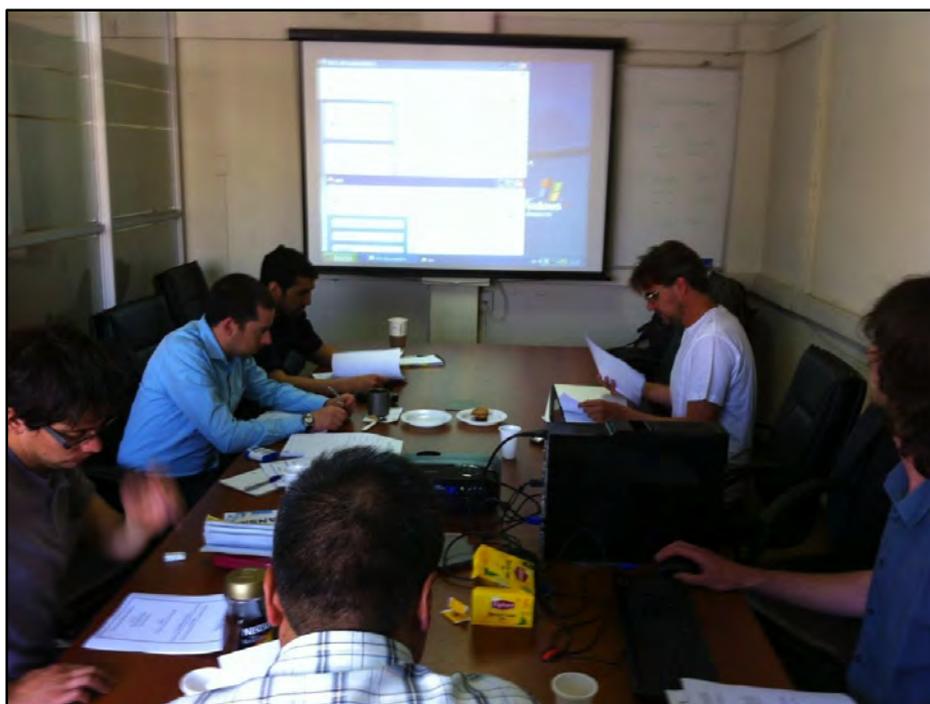


Fig. 5.2-B. Taller de zonificación de riesgo y modelación de lahares.

Los temas tratados fueron:

1. Definición y génesis de un lahar.
2. Reología, facies y dilución de un lahar.
3. Elección de DEM.
4. Modelación con LaharZ
 - ❖ Estimación de volúmenes.
 - ❖ Modelación.
5. Modelación con MSF.

El material de trabajo para el taller “Zonificación de Riesgos y Modelación de Lahares” se encuentra en los Anexos Digitales.

6. CARACTERÍSTICAS Y DETALLES PARA LA IMPLEMENTACIÓN Y OPERACIÓN DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN SATELITAL DE DATOS

La Bases Técnicas indican que se deben instalar las estaciones meteorológicas automáticas (AWS) tipo GEUS (Servicio Geológico de Dinamarca y Groenlandia. <http://www.geus.dk/geuspage-uk.htm>) y realizar su mantención correspondiente de acuerdo a los procedimientos indicados por GEUS (Citterio, 2009; Citterio, 2011). Las estaciones cuentan con los siguientes instrumentos:

- Radiación solar de onda corta (incidente y reflejada)
- Radiación de onda larga (incidente y emitida)
- Temperatura y humedad del aire
- Temperatura del aire con sensor aspirado (y humedad del aire en algunos casos)
- Altura de nieve
- Dirección y velocidad del viento
- Presión atmosférica.

Luego de evaluar varias alternativas, Geoestudios decidió utilizar el sistema de transmisión satelital Iridium que ofrece Micro-Specialities. Inc., para lo cual se adquirieron los modem (Global Modem) y antenas necesarias para el envío de mensajes y se suscribió a una cuenta de envío de datos.

Toda la bibliografía e información obtenida sobre el sistema de transmisión Iridium se adjunta en los anexos digitales.

6.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN SATELITAL

El sistema de transmisión satelital utilizado corresponde al sistema de transmisión Iridium que ofrece Micro-Specialities. Inc. (www.Micro-Specialties.com) a través de su sistema SBD (Short Burst Data) de envío de mensajes cortos.

El sistema de transmisión utiliza un Modem (Global Modem) y antena conectados al

datalogger de la estación meteorológica que envía los mensajes en código binario a la red de satélites, cuya información luego es recibida por la puerta de enlace (gateway) del equipo de la red SBD de Micro Specialities (MSI) y es convertido a formato de texto. El producto se entrega a través de una página web, desde donde puede se pueden obtener los datos en forma manual o automáticamente descargar a un computador o servidor.

La red Iridium utilizada consiste en 66 satélites LEOS (Low Earth Orbiting Satellites) los que proveen comunicación desde virtualmente cualquier punto de la superficie terrestre. La diferencia entre la red Iridium y otras redes satelitales se debe a que la comunicación se realiza entre los modem y los satélites, entre satélite y satélite. y entre los satélites y la puerta de enlace de MSI, facilitando la comunicación.

El Global Modem (Fig. 6.1-A) fue diseñado para ser utilizado con los data logger de Campbell Scientific CR1000 o CR800. Para este proyecto se comprobó que también puede ser utilizado por los CR3000, modelo utilizado por la DGA.



Fig. 6.1-A. Modem para transmisión de datos satelitales.

Cada modem viene con un nombre de fabricación identificado por MSI y utilizado para la recuperación de datos. Los nombres de las estaciones instaladas en este estudio son los siguientes:

Estación Bello: N172

Estación Yeso: N173

Estación Exploradores: N174

Estación Tyndall: N175

6.2. COSTOS DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN

El costo del sistema de transmisión que incluye el Global Modem, la antena y el cable coaxial de la antena es de entre 750 USD y 1.000 USD, dependiendo de la configuración de la antena, al comprarlo directamente en Micro Specialities.

En nuestro caso, compramos el sistema a través de Tecnología Omega, con un costo igual a 1.500.000 pesos cada sistema completo con antena de alta ganancia.

La cuenta para el envío de datos tiene un costo fijo mensual de 25 USD por unidad de transmisión, que incluye un flujo base de 12.000 bytes, sobre los cuales el flujo adicional tiene un costo de 1,5 USD cada 1.000 bytes.

El envío de datos se realiza en código binario, cada mensaje consiste en la fecha y hora (20 bit) seguidos de los valores de los datos con formato FP2 (16 bit).

Si se envían 14 parámetros cada hora, al mes se envían el siguiente tamaño de datos:

(Fecha y hora (20 bit) + 14*dato (16 bit))*24*30 /8 = 21.960 Bytes
12.000 bytes (plan base) + 9.960 bytes (extras)

Lo que da un gasto mensual de 35 USD mensuales.

6.3. CONSUMO DE ENERGÍA DE ESTACIONES

El consumo de las estaciones depende del gasto de medición de los sensores el procesamiento de los datos y el envío de datos.

Considerando que han sido programadas para efectuar hasta 10 intentos de envío de datos cada hora, el gasto depende de la cantidad de veces que se intente, llegado al máximo gasto cuando realiza los 10 intentos.

Para analizar el consumo de las estaciones se efectuaron pruebas en una estación instalada en las oficinas de Geoestudios, funcionando con todos sus sensores y transmisión satelital de datos cada una hora, conectada a un medidor de corriente, de **carga y potencia, "Watt's Up"** (<http://www.rc-electronics-usa.com/ammeters/dc-amp-meter.html>) con resolución de 0,01A y precisión de $\pm(2\%+0,06)$.

Se ha establecido que el consumo de los distintos aparatos según especificaciones del fabricante corresponde a:

- Modem

0,045Ah encendido en modo de espera.

1,6Ah máximo al transmitir datos.

0,002Ah promedio conectado a un datalogger transmitiendo 1 vez por hora.

- Datalogger

0,002Ah encendido en modo de espera.

0,038Ah tasa de muestreo de 100Hz y comunicación a través del puerto RS-232.

- **Registrador de consumo "Watt's Up".**

0,007Ah en funcionamiento.

Se efectuaron tres pruebas para determinar el consumo en distintos escenarios, en cada caso, las pruebas se efectuaron durante 48 horas continuas, con esta información se determinó el consumo por hora, incluido el del registrador de consumo.

El consumo de una estación en los diferentes casos es:

- Capturando y almacenando datos, sin transmisión, 0,043 Ah con un voltaje de 12V.

- Capturando y almacenando datos, con transmisión cada 1 hora, en caso de envío de mensajes al primer intento, el consumo de carga es de aproximadamente 0,045 Ah con un voltaje de 12 V;
- Capturando y almacenando datos, con transmisión cada 1 hora, en caso de 10 intentos fallidos de transmisión cada hora, el consumo es de aproximadamente 0,047 Ah con un voltaje de 12 V.

El resultado de las pruebas que hemos efectuado, considerando el consumo de la estación sin transmisión satelital, sumado a la diferencia en el consumo por 10 intentos fallidos cada hora para enviar el mensaje y a la diferencia en el consumo por enviar mensajes exitosamente al primer intento cada hora. Indican que en el peor escenario, si se lograra la transmisión de datos al onceavo intento cada hora, la estación consumiría 0,006 Ah. más que una estación que no tenga implementado el sistema de transmisión de datos satelital Iridium.

6.4. PROGRAMACIÓN DEL SISTEMA

La programación del sistema de transmisión satelital se realiza en conjunto con la programación de la toma de datos de la estación en el data logger CR3000, con el software LoggerNet de Campbell Scientific, en el lenguaje CRBasic utilizado por los data logger.

Las estaciones se programan para medir datos cada 10 minutos, registrando en el datalogger los datos instantáneos y los datos promedios cada 1 hora. Los datos promedios, cada una hora en verano y cada 3 horas en invierno se envían por mensaje vía satelital al fin de cada periodo. Ambos registros quedan almacenados en el data logger y pueden ser descargados de forma directa.

Los datos quedan registrados en el data logger en las siguientes tablas:

- Estacion_ver: datos promedio cada una hora
- Estación_ver_ist: datos instantáneos cada una hora
- Estacion_inv: datos promedio cada 3 horas
- Estacion_inv_inst: datos instantáneos cada 3 horas

La programación para el envío de los datos satelitales utiliza dos subrutinas, una de transformación de datos ASCII a binario (FP2) y otra de envío de datos. Ambas se acceden desde un programa de segunda prioridad (SlowSequence) después del programa principal que realiza la medición de los sensores y guarda los datos en las tablas, para que en caso de escasa batería la estación primero mida y almacene los datos y después, si hay suficiente energía en la batería, pueda enviar los datos.

El programa de envío de datos realiza 10 intentos de envío, después de los cuales deja de intentar y espera hasta el siguiente periodo para realizar el envío de los nuevos datos. (Los datos que no fueron enviados se pierden en la línea de transmisión, pero siempre se pueden recuperar desde el datalogger en forma directa).

6.5. CODIFICACIÓN BINARIA UTILIZADA PARA LA TRANSMISIÓN DE DATOS

La codificación binaria se realiza en el programa del datalogger Campbell CR3000 de cada estación, para esto se utilizaron dos subrutinas desarrolladas por Micro-Specialities. Inc. La primera (float2FP2) que transforma los datos ASCII de float a binario FP2 (two-byte floating point), y la segunda (sendvalues) que envía los mensajes a través del Global Modem. En los anexos digitales se adjunta un programa de ejemplo desarrollado por Micro-Specialities, Inc. con estas 2 subrutinas.

Los datos enviados tienen un formato FP2, que corresponde a 4 dígitos. lo que consideramos adecuado a los parámetros medidos, precisión y objetivo de uso. Los dataloggers de las estaciones están programados para enviar la fecha y hora más los promedios 14 o 15 parámetros medidos. Cada mensaje tiene un tamaño de 2,5 bytes (20 bit) con la fecha y hora más 2 bytes (16 bit) por cada parámetro. Lo que resulta en un total por mensaje de 30,5 bytes con 14 parámetros y 32,5 bytes en el caso de 15 parámetros.

Las ventajas del sistema implementado es el ahorro de enviar los datos en formato binario y no como ASCII, que significa un ahorro de aproximadamente un 60% (comunicación personal, Michele Citterio, GEUS). Con Micro-Specialities, Inc. existe además la facilidad de recuperación y lectura de datos, ya que se envían en formato ASCII CSV separado por coma.

6.6. INSTALACIÓN DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN

6.6.1. Conexión del modem y antena

El modem trae dos juegos de cables, uno de ellos está comprendido por los cuatro cables que se conectan a una de las regletas del datalogger, a través de los cuales se intercambian los datos y se controla el encendido y apagado. El otro es para la conexión del modem a la fuente de energía, desde la que se alimenta para su funcionamiento y transmisión. También cuenta con una conexión tipo TNC Hembra para antena, se puede utilizar una externa o interna dependiendo del material de la caja contenedora del Datalogger y Modem. En cajas que no son metálicas es posible utilizar una antena interna adosada a la parte superior como se muestra en la Fig. 6.1-A. En el caso de las estaciones equipadas por Geoestudios se utilizaron antenas externas Iridium AERO Mod.AT1621-142W con 50 Ohms de ganancia para aumentar las probabilidades de efectuar exitosamente las transmisiones. En la Fig. 6.6.1-A se presenta el mapa de conexión del Global Modem al datalogger.



Fig. 6.6.1-A. Mapa de conexión del Global Modem.

6.6.2. Programa

El programa para cada estación se debe adecuar según los parámetros medidos, la conexión de los sensores y los datos que se desean enviar.

Como se explicó anteriormente el programa está escrito en CRBasic, a través del

programa Logger net, el cual trae incluido un manual y una herramienta de ayuda que permiten al usuario conocer el significado de todas sus funciones.

A continuación se describen las partes principales del programa de ejemplo:

- Se declara el nombre de la estación

StationName (Exploradores)

- Se define el modo de procesamiento

SequentialMode

- se declaran todas las variables públicas. las constantes y unidades de las variables utilizadas

Const valueArrayLen = 30 ...

Public logger_temp, batt_volt...

(En esta parte se deben modificar las variables utilizadas por los sensores en caso de ser diferentes. las variables utilizadas por el global modem y las utilizadas para contar la fecha tiempo se dejan igual)

- se crean las tablas con todos sus datos

DataTable (Exploradores_ver,True,-1)

Minimum (1,batt_volt,FP2,0,False)

Average (1,cnr4(1),IEEE4,False)...

EndTable

(En esta parte se debe modificar el nombre de la tabla y los parámetros que se registrarán)

- se crea la subrutina float2FP2

Sub float2FP2(result As Long,doVal As Float)...

(subrutina que transforma los datos de a FP2)

- se crea la subrutina sendvalues

Sub sendvalues(dataDate As Long, values2send As Long)...

(subrutina que envía los datos)

- se crea el programa principal

BeginProg...

- Se inicia el escaneo

Scan(10,min,1,0)...

- Se miden todos los parámetros

(Aquí se debe modificar según los sensores utilizados y conexión de los sensores)

- Se define si es verano o invierno

RealTime(rTime)

If DayofYear >=BeginOfWinter AND DayofYear < BeginOfSummer Then

IsSummer = False

Else

IsSummer = True

Endif

- Se llama y rellenan las tablas según temporada

CallTable(Exploradores_inv)

(Aquí se deben modificar los nombres de las tablas)

- Se inicia el scan de segunda prioridad donde se envían los datos

SlowSequence...

(Aquí se debe especificar el nombre de la tabla de datos a enviar. Exploradores_ver. y cuantos datos se desean enviar en la variable values2send. 14 en este caso)

GetRecord(TableData,Exploradores_ver,1)

dataDate = INT(Exploradores_ver,Timestamp(2,1))/60...

values2send = 14...

- Se finaliza el programa

EndProg

6.7. RECUPERACIÓN DE DATOS

Los datos pueden ser recuperados de una página web directamente de forma manual o pueden ser descargados de forma automática desde la página web a un computador o servidor de forma automática a través de un script en Python.

6.7.1. Recuperación de datos desde la página web

La página web de GlobalModemData es la siguiente:

<http://denali.micro-specialties.com/cgi-bin/globalModemData.cgi?>

Con las siguientes opciones:

site=sitename donde sitename es el nombre del Global modem

start=YYYY/MM/DD donde YYYY/MM/DD es la fecha de inicio del registro

end=YYYY/MM/DD donde YYYY/MM/DD es la fecha de fin del registro

fun=today devuelve los datos del día en curso

fun=last devuelve los últimos datos enviados

fun=all devuelve todos los datos enviados

fun=help devuelve el menú de ayuda

Un ejemplo de la dirección de la página web de la estación Exploradores cuyo modem se llama sn174 y con la opción fun=all es:

<http://denali.micro-specialties.com/cgi-bin/globalModemData.cgi?site=sn174&fun=all>

Los datos se despliegan en el siguiente formato:

```
#function: show all records
```

```
#site: sn174
```

```
2013/10/30          19:00,13.32,48.24,12.67,361.2,343.6,1.54,169.1,-75.01,-
```

```
25,4.227,985,167.5,0,0
```

```
2013/10/30          20:00,13.1,11.36,2.611,357.5,341.7,0.052,291.8,-75.01,-
```

```
25,3.302,986,167.5,0,0
```

2013/10/30	21:00,12.88,6.001,4.947,354.8,346.5,0.861,124.1,-74.99,-5.01,5.309,986,167.6,0,0
2013/10/30	22:00,12.75,-0.185,-1.434,354.9,343.3,0.769,169.5,-75,-25,2.799,986,167.9,0,0
2013/10/30	23:00,12.68,1.160,-0.092,352.4,344.6,1.202,225.4,-75,-24.99,3.113,986,167.6,0,0
2013/10/31	00:00,12.64,1.597,-0.313,351.5,342.3,0.052,167.6,-75,-25,2.59,986,167.8,0,0

Donde la primera línea muestra la función requerida, en este caso mostrar todos los datos. La segunda línea es el nombre del sitio, el cual puede ser modificado y las siguientes líneas son la fecha, hora y datos promedio enviados. Los datos están separados por comas y en un formato de 4 dígitos con un punto como divisor decimal.

Para pasar los datos a una planilla de Excel, en primer lugar se debe preparar la hoja con los encabezados de cada columna de acuerdo a los datos guardados en la tabla definida en el programa del datalogger (ej: Tabla_ver_exploradores), a continuación se deben seleccionar y copiar los datos desde la página web, pegarlos en la primera celda libre de arriba hacia abajo en la primera columna de la planilla de datos, esta puede ser denominada "fecha", o como en la Fig. 6.7.1-A llevar el nombre de la estación, seleccionar de la barra de herramientas la opción "texto en columnas", en la ventana que aparece seleccionar datos delimitados separados por comas o tabulaciones, en la siguiente ventana seleccionar la casilla "comas", en la siguiente ventana seleccionar "avanzadas", establecer que el separador decimal corresponde a puntos y no tiene separador de miles, apretar Aceptar, luego finalizar. Por último, puede seleccionar todos los datos a excepción de la primera columna, establecer en el formato de celdas que los valores son números con dos decimales y la información se verá ordenada como se muestra en la Fig. 6.7.1-A.

AWS Exploradores	Batt	Short up	Short dn	Long up	Long dn	Win vel	Win dir	T°	Hr	T° aspirado	Bp	Alt Nieve	Eje X	Eje Y
25-11-2013 20:00	13,46	38,68	13,90	305,10	352,20	1,43	222,00	-1,38	66,60	9,10	1002,00	167,40	0,00	0,00
25-11-2013 21:00	13,18	11,41	7,06	299,20	349,00	2,40	107,00	-2,70	75,31	8,56	1002,00	168,20	0,00	0,00
25-11-2013 22:00	12,93	-3,06	0,99	293,50	346,00	0,24	147,00	-3,22	74,46	7,42	1002,00	167,80	0,00	0,00
25-11-2013 23:00	12,78	-4,54	-0,57	286,10	341,10	0,80	199,30	-6,35	87,50	4,05	1003,00	168,10	0,00	0,00
26-11-2013 0:00	12,69	-2,39	0,61	282,10	336,70	1,28	168,10	-8,55	95,60	2,26	1002,00	167,90	0,00	0,00
26-11-2013 1:00	12,64	-1,85	0,88	282,60	334,70	1,20	181,00	-8,86	95,70	1,69	1002,00	167,90	0,00	0,00
26-11-2013 2:00	12,60	-0,35	1,66	286,50	334,00	0,48	147,40	-9,01	98,90	1,79	1002,00	167,80	0,00	0,00
26-11-2013 3:00	12,58	-0,34	0,39	331,00	336,50	1,02	136,60	-9,41	96,00	1,28	1001,00	167,80	0,00	0,00
26-11-2013 4:00	12,57	1,29	0,37	336,50	337,30	0,65	181,00	-8,90	100,90	1,88	1001,00	167,80	0,00	0,00
26-11-2013 5:00	12,56	0,24	-0,46	345,20	337,90	0,59	215,80	-9,30	99,00	1,44	1000,00	167,80	0,00	0,00
26-11-2013 6:00	12,55	2,59	0,24	346,30	338,00	0,64	184,70	-9,44	101,40	1,45	1000,00	167,70	0,00	0,00
26-11-2013 7:00	12,58	40,38	9,80	346,40	338,20	0,84	181,20	-9,38	101,00	1,24	999,00	167,80	0,00	0,00
26-11-2013 8:00	12,70	74,74	19,11	347,40	339,50	1,16	167,50	-8,97	99,40	1,56	999,00	167,80	0,00	0,00
26-11-2013 9:00	12,94	135,20	35,18	348,70	340,70	0,92	176,30	-8,66	99,40	1,79	999,00	167,80	0,00	0,00
26-11-2013 10:00	13,67	292,20	75,09	351,30	344,00	0,98	146,70	-7,79	97,90	2,18	998,00	167,90	0,00	0,00
26-11-2013 11:00	14,38	375,40	99,80	355,50	346,30	1,33	170,90	-7,38	94,70	2,82	998,00	167,80	0,00	0,00
26-11-2013 12:00	14,39	449,20	119,70	360,60	348,70	2,06	165,60	-6,56	90,40	3,45	997,00	168,20	0,00	0,00
26-11-2013 13:00	14,38	646,30	177,70	363,30	353,70	0,95	171,20	-4,77	82,10	4,77	997,00	168,00	0,00	0,00
26-11-2013 14:00	14,40	727,30	198,80	358,90	354,30	2,70	148,80	-5,09	79,14	4,83	996,00	168,10	0,00	0,00
26-11-2013 15:00	14,39	0,00	301,50	332,30	358,40	2,82	151,70	-4,50	75,70	5,37	995,00	168,10	0,00	0,00
26-11-2013 16:00	14,11	880,00	235,20	317,60	356,80	2,34	116,90	-2,84	71,53	6,31	994,00	168,00	0,00	0,00
26-11-2013 17:00	14,03	789,50	208,30	328,10	367,20	3,00	338,40	2,95	55,45	12,71	993,00	167,90	0,00	0,00
26-11-2013 18:00	14,07	631,70	158,70	326,50	364,30	5,33	323,80	2,75	55,78	12,94	993,00	167,50	0,00	0,00
26-11-2013 19:00	13,69	85,60	24,26	314,30	359,50	7,00	313,80	1,51	60,89	11,94	992,00	167,50	0,00	0,00
26-11-2013 20:00	13,42	35,35	10,02	307,60	357,20	6,10	332,10	0,08	66,52	10,82	992,00	167,80	0,00	0,00
26-11-2013 21:00	13,14	11,41	3,77	305,70	355,10	5,92	334,80	-0,11	64,20	10,36	992,00	167,90	0,00	0,00
26-11-2013 22:00	12,91	-2,60	0,66	303,90	353,70	7,05	315,90	-0,78	69,34	9,71	993,00	167,90	0,00	0,00
26-11-2013 23:00	12,77	-2,27	-0,02	311,00	352,20	10,06	334,50	-1,80	75,26	8,70	993,00	168,20	0,00	0,00
27-11-2013 0:00	12,70	-0,98	1,99	305,60	349,60	2,00	241,40	-2,47	78,56	8,64	994,00	167,90	0,00	0,00
27-11-2013 1:00	12,65	-0,72	2,80	312,80	347,30	3,10	338,40	-3,55	81,60	6,99	993,00	167,40	0,00	0,00
27-11-2013 2:00	12,62	-2,52	-1,07	321,40	347,90	0,95	267,50	-3,66	82,60	7,03	993,00	167,80	0,00	0,00
27-11-2013 3:00	12,60	-0,32	-0,37	351,00	348,80	2,83	6,20	-3,43	80,00	7,26	993,00	167,70	0,00	0,00
27-11-2013 4:00	12,59	1,80	0,81	357,30	345,40	1,68	238,20	-4,36	79,51	5,34	993,00	167,90	0,00	0,00
27-11-2013 5:00	12,58	-0,05	-0,46	360,40	348,60	2,05	343,50	-3,46	83,30	7,04	992,00	167,70	0,00	0,00
27-11-2013 6:00	12,57	1,97	-0,06	360,30	348,60	1,09	161,00	-3,55	84,40	7,12	992,00	168,30	0,00	0,00
27-11-2013 7:00	12,60	30,33	6,95	360,20	350,40	4,17	346,80	-3,31	84,60	7,52	992,00	168,20	0,00	0,00
27-11-2013 8:00	12,74	105,20	22,23	356,30	350,70	4,49	302,20	-3,06	84,90	7,60	991,00	167,80	0,00	0,00
27-11-2013 9:00	13,06	134,20	28,18	363,90	354,60	3,59	274,30	-2,03	75,68	8,75	992,00	167,40	0,00	0,00
27-11-2013 10:00	13,31	134,70	29,49	367,20	354,60	4,72	313,80	-1,55	73,78	9,24	992,00	168,00	0,00	0,00
27-11-2013 11:00	13,52	152,70	31,90	366,80	354,30	6,44	328,10	-2,02	67,39	8,63	991,00	168,10	0,00	0,00

Fig. 6.7.1-A. Planilla Excel con datos importados desde la página web.

6.7.2. Recuperación de datos desde MSI a través de un Script

A continuación se muestra la traducción de un documento enviado por los proveedores de los "GlobalModem," para a través de una aplicación, implementar la recuperación de datos en forma automática, desde el sitio Web donde se almacenan a un archivo en un computador conectado a internet. (El documento original se encuentra en Anexos digitales).

(Copia del programa Python 2.7.5 y el script "msiDataSyncR1" se encuentran en el anexo digital 06 "transmisión de datos vía satélite".)

MSI recibe y archiva todo el tráfico de datos de los Global Modem en su centro de datos ubicado en Wasilla, Alaska. Normalmente, nuestros clientes utilizan el proceso de recuperación de datos desde la web de MSI, que puede entregar datos en cualquier rango de fechas para todos los Global Modem. Para automatizar la recuperación de datos MSI

desarrolló del Script de sincronización de datos de MSI, llamado "msiDataSysnc.py". Este es un script en Python diseñado para sincronizar un conjunto de archivos de datos en el equipo o servidor de un cliente con los archivos de MSI datos para uno o más Global Módems. Los archivos de datos resultantes son archivos de texto plano de valores separados por comas (CSV) que son similares a archivos CSV utilizados a menudo en la distribución de datos. En la parte superior de cada archivo hay un conjunto de tres 3 "encabezados", que definen las etiquetas de los datos, unidades de datos y el proceso utilizado para derivar cada columna de datos. Los archivos CSV son fácilmente importados para aplicaciones de bases de datos y hojas de cálculo.

Si se están sincronizando los datos de varios módems, todos los archivos locales contendrán los mismos encabezados de datos. Si sus sitios utilizan distintos programas de colección de datos, se debe ejecutar una versión separada del Script "msiDataSync" editado por cada programa de recolección de datos, así, los encabezados de datos coincidirán con los datos del sitio.

Los scripts del programa Python son "solo texto", se puede mirar el código y editar con cualquier editor de texto, como EditPad o WordPad, pero sería mejor abrirlo con el editor de Python que se instala con el programa Python disponible en Python.org. Recuerde que en Python los espacios no son iguales que las tabulaciones.

6.7.2.1. **Funcionamiento del script.**

Hay una lista de estaciones de datos llamada estaciones, lo que se define en la línea 184. El proceso circula por la lista de nombres de estación. Los nombres de las estaciones son texto literalmente, el proceso no es sensible a mayúsculas, así que "SN174" es igual a "sn174".

6.7.2.2. **Proceso para cada estación.**

- Cargar la copia del conjunto de datos de la estación desde el archivo local, si existe ese archivo.
- Si no existe ningún archivo local, el proceso descargará el conjunto entero desde MSI.

- Si existe el archivo local, el proceso descargará el conjunto de datos completo desde la medianoche (00:00) de la fecha del último registro en el archivo local.

Todos los archivos descargados se clasifican en la base de datos local. Luego se actualiza el archivo local para cada sitio con el nuevo conjunto de datos.

6.7.2.3. **Preparar msiDataSync para la ubicación de archivos y el conjunto de módems.**

- Asegúrese de tener Python 2.x instalado.
- Abra msiDataSyncR1.py con el editor de Python y edite la variable "siteFolderPath" en la línea 187 (actualmente contiene "C:\tempData\"). En Linux o Unix la ruta quedaría similar a: "/usr/tempData/".
- Edite las listas "etiquetas de columnas", "unidades de columna" y "procesos de columna" a partir de la línea 37. Cada lista es un conjunto de cadenas de caracteres etiquetados en comillas simples o dobles, separados por comas.
- Guarde el script "msiDataSyncR1.py"
- Ejecute "msiDataSync.py" desde el Editor de Python (F5). Aparecerá la ventana de Python y algunos mensajes de progreso se desplazarán. Si aparece cualquier advertencia de diagnóstico (generalmente imprimidas en rojo), la definición de la ruta a la carpeta del sitio puede estar equivocada, o puede haber olvidado una comilla o coma cuando editó los encabezados o rutas al archivo.

Se creará un archivo en la carpeta de destino para cada estación.

La configuración para ejecutar el proceso como una tarea programada varía dependiendo del sistema operativo. Puede que tenga que identificar el script "msiDataSyncR1.py" como ejecutable para que el programador de tareas lo ejecute en Linux o Unix. Asegúrese de que el usuario que ejecuta el script cuenta con permisos para leer, escribir y crear en el la ruta a la carpeta del sitio.

En caso de tener alguna consulta o problema con este script, deberá comunicarse directamente con:

Richard M. Brown, Presidente de Micro Specialties. Inc.

Teléfono. 907-373-7424

Celular. 907-354-7424

Correo electrónico. richard@micro-specialties.com

El script en Python se adjunta en los Anexos Digitales (msiDataSyncR1.py).

6.8. CHEQUEO DE OPERACIÓN

Para chequear la operación el global modem cuenta con tres luces indicadoras LED:

- PCB Pwr: indica que la fuente de energía del modem esta activada
- Modem Pwr: indica que el trasmisor del modem está activado
- Net Avail: indica que el modem ve la red de transmisión

En operación normal los LED PCB Pwr y Modem Pwr se encenderán cuando el CR300 inicia el proceso y segundos después se enciende el LED Net Avail. Según la programación realizada, la transmisión se realiza cada 1 hora en verano y tres horas en invierno por lo que se puede chequear la operación al fin de estos periodos pasado 45 segundos, debido al retraso de 45 segundos (progamable) para iniciar el escaneo de los sensores.

Todos los antecedentes recopilados a lo largo del estudio se encuentran en el anexo **"transmisión de datos vía satélite"**

7. ASESORAMIENTO TECNICO EN LA RED GLACIOLÓGICA DE MONTAÑA

7.1. INTRODUCCIÓN

La DGA solicita como parte de este proyecto la asesoría de ubicaciones idóneas donde ampliar la cobertura de la red de monitoreo para cumplir lo establecido en la Estrategia Nacional de Glaciares (ENG). Se propone para ello redes de monitoreo para el monitoreo glaciológico que sean factibles de implementar de acuerdo a los objetivos y requerimientos de la DGA, junto con la recomendación de instrumentos que conformará cada estación teniendo en consideración, entre otros, la zona glaciológica y el gradiente altitudinal, incluyendo glaciares descubiertos, cubiertos y de rocas. Se describen, entre otras, las condiciones de acceso, climáticas y de representatividad de varios glaciares propuestos.

7.2. ESTRATEGIA NACIONAL DE GLACIARES

La Dirección General de Aguas inició estudios de observación sistemática de glaciares en 1975 con el glaciar Echaurren en la cuenca del río Maipo. Los estudios de la DGA comenzaron en el Departamento de Hidrología, y luego, mediante la creación de la Unidad de Glaciología y Nieves (UGN) en 2008 se incrementó sustancialmente el alcance de dichos estudios, cuyo marco de acción queda estipulado en la Estrategia Nacional de Glaciares (ENG, DGA 2009).

Chile se divide en 4 zonas glaciológicas: zona Norte (**desde el límite con Perú hasta la cuenca del río Choapa**), zona Centro (**de la cuenca del río Aconcagua hasta la del río Maule**), zona Sur (**de la cuenca del río Itata hasta la del río Aysén**) y Austral (**desde la cuenca del río Baker al extremo austral del país**). La ENG estipula en un horizonte de 5, 10 y 20 años los siguientes 5 niveles de observación contemplados en un estudio jerárquico e integrado de glaciares, desde el Nivel 1 (más detallado) al Nivel 5 (menos detallado), según una propuesta del World Glacier Monitoring Service (WGMS, Haeberli et al., 2002):

Nivel 1

Se contemplan estudios de combinación de balances de masa, energía e hídricos, modelación hidrológica y proyección de dinámica glaciar frente a escenarios de cambio climático, análisis isotópicos y paleoclimáticos, topografía superficial de precisión, estructura interna del hielo, y estudio de flujo del hielo. Los métodos incluyen red de balizas, pozos estratigráficos, instalación de AWS y estaciones fluviométricas, análisis satelital termal, cámaras infrarrojas aerotransportadas, altimetría láser, GPS geodésico, fotogrametría terrestre y teodolitos, GPR, testigos de hielo, neviza y nieve. La precisión esperada es métrica a submétrica y la escala espacial es local, con el objetivo de establecer 4 glaciares en Chile, 1 por cada zona glaciológica.

Nivel 2

Se contemplan estudios de balance de masa y de energía, balance hidrológico, modelación del flujo de hielo, análisis biológicos, químicos y físicos, y modelación de parámetros para proyección de caudal. Los métodos incluyen red de balizas, pozos estratigráficos y equipo Monte Rosa, instalación de AWS y termocuplas, sistema de aforo en cabeceras de cuencas con aporte glaciar, extracción de testigos de nieve superficiales, uso de GPS geodésicos en perfiles y balizas, y extrapolación de datos discretos a toda la superficie glaciar. La precisión esperada es métrica y la escala espacial es local, con el objetivo de establecer 14 glaciares en total en Chile, del orden de 3 a 5 por cada zona glaciológica, con frecuencia bimensual a semestral.

Nivel 3

Se contemplan estudios de cambios volumétricos, generación de modelos digitales de elevación, y determinación de topografía subglacial. Los métodos incluyen comparación de datos topográficos de distintas fechas, láser aerotransportado de barrido (LIDAR), y uso de sistemas de radar. La precisión esperada es métrica y la escala espacial es regional, con el objetivo de establecer 50 glaciares en total en Chile, del orden de 10 a 18 por cada zona glaciológica, con frecuencia anual.

Nivel 4

Se contemplan estudios de variaciones frontales y variaciones areales. Los métodos incluyen la consulta de fuentes históricas, y el análisis multitemporal de fotografías aéreas e imágenes satelitales. La precisión esperada es métrica a decamétrica y la escala espacial cubre zonas glaciológicas, con el objetivo de establecer 100 glaciares en Chile,

del orden de 15 a 37 por cada zona glaciológica, con frecuencia interanual (5 años).

Nivel 5

Se contempla realizar inventarios en zonas no inventariadas e inventarios de glaciares de rocas, con actualización de inventarios al año 2000. Los métodos incluyen análisis de bandas espectrales (band ratio) de imágenes satelitales, la digitalización manual y la clasificación automática. La precisión esperada es decamétrica y la escala espacial es nacional, con el objetivo de inventariar todos los glaciares de Chile con frecuencia decadal.

En cuanto a número de glaciares a estudiar, la propuesta concreta de la ENG (DGA, 2009) a 10 años plazo se presenta en la Tabla 7.2-A.

Tabla 7.2-A. Niveles de observación contemplados en el estudio jerárquico e integrado de glaciares de la Estrategia Nacional de Glaciares (DGA, 2009), según una propuesta del World Glacier Monitoring Service (WGMS, Haeberli et al., 2002).

Nivel de estudio	Zona Norte	Zona Centro	Zona Sur	Zona Austral
Nivel 5, detalle mínimo (inventarios)	Todos	Todos	Todos	Todos
Nivel 4, detalle bajo (variaciones)	13	20	34	33
Nivel 3, detalle intermedio (cambios volumétricos)	7	10	17	16
Nivel 2, detalle intensivo (balances, etc.)	3	4	2	5
Nivel 1, detalle máximo	1	1	1	1

7.3. RECOMENDACIONES SOBRE LA RED DE MONITOREO DE GLACIARES

Las recomendaciones que se expresan a continuación se refieren a la implementación de un estudio de Nivel 1: "monitoreo de detalle intensivo y multidisciplinario a nivel local a escala temporal de años, meses y días, utilizando múltiples metodologías y alta resolución espacial y temporal" (ENG, 2009). Estos estudios de detalle servirán para comprender el glaciar en forma sistémica, y asimismo para evaluar las precisiones de diversos métodos

de aplicación espacial más amplia. Claramente no es preciso incluir todas las acciones contempladas en un estudio de Nivel 1, algunas de las cuales son de un ámbito principalmente científico (por ejemplo el estudio del paleoclima) sino que es necesario enfocar los esfuerzos en determinar las características principales de los glaciares en lo referente a los aspectos de relevancia para la sociedad, incluyendo los recursos hídricos, su estabilidad y la evaluación de peligros potenciales, y sus proyecciones futuras.

7.3.1. Zona Norte

La DGA ha realizado diversos estudios en glaciares de las cuencas de los ríos Copiapó y Elqui. Empresas mineras (Pascua Lama) y el CEAZA también realizan periódicamente mediciones glaciológicas en diversos glaciares en la zona. Se propone comenzar un programa glaciológico sistemático en cada uno de los siguientes glaciares:

- Glaciar Tapado, glaciar descubierto en su zona alta y cubierto en su zona baja, 2,2 km²
- Glaciar de rocas sin nombre, código DGA CL104300054, 1,0 km².

El acceso es expedito, se puede llegar en vehículo a unos 3 km del frente de ambos glaciares a través del camino internacional La Serena – Paso de Agua Negra, a una cota de 4000 m s.n.m., y desde ese punto caminar a los glaciares.

Acerca de instrumentación, se sugiere instalar una estación meteorológica automática (AWS) tipo GEUS en cada glaciar, así como una estación hidrológica en una zona adecuada en cada efluente de los 2 glaciares.

De modo de robustecer la capacidad técnica local, para lo cual se sugiere realizar talleres de capacitación, y por las propias facilidades logísticas en la zona, se sugiere realizar este monitoreo en colaboración con el Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas (CEAZA).

7.3.2. Zona Centro

Actualmente la DGA mantiene con recursos y personal propio un programa de monitoreo del glaciar Echaurren Norte, desde 1975. Es sin duda valioso poder continuar estas mediciones, que corresponden al Nivel 1 de la ENG. Sin embargo dado el pequeño tamaño del glaciar ($0,4 \text{ km}^2$) y a su escasa amplitud altitudinal (3600-3950 m s.n.m.) se considera que no es realmente un glaciar representativo. De hecho, en años con acumulación neta positiva (por ejemplo años El Niño) y en años secos (La Niña) no se puede distinguir una zona de acumulación (inexistente en años secos) y una zona de ablación (inexistente en años secos). Considerando además la pérdida de hielo que ha experimentado, se recomienda comenzar a monitorear un glaciar más grande y con mayor rango altitudinal en la misma cuenca (Maipo). Asimismo, dada la relevancia de los glaciares cubiertos y de rocas en la zona Centro, y la creciente discusión sobre su relevancia hídrica, se recomienda asimismo poder comenzar el monitoreo de un glaciar cubierto y un glaciar de rocas representativos en la cuenca del Maipo.

Tres buenos candidatos de glaciares existen en la sección alta del Cajón del Yeso:

- Glaciar Bello, glaciar descubierto, $4,2 \text{ km}^2$
- Glaciar Pirámide, glaciar cubierto en su zona de ablación, $4,4 \text{ km}^2$
- Glaciar de rocas P, $0,4 \text{ km}^2$, correspondiente al glaciar de rocas del Pirámide. P, $0,4 \text{ km}^2$.

En los tres glaciares la DGA ha realizado mediciones glaciológicas básicas (ej. DGA, 2012). El acceso es bastante expedito, se puede llegar en vehículo a las Termas del Plomo (3000 m s.n.m.) y desde ese punto caminar a los tres glaciares (menos de 10 km al glaciar Bello, unos 3 km al frente del glaciar Pirámide y menos de 5 km al glaciar de rocas P, que se pueden cubrir cómodamente en una jornada con factibilidad de apoyo de mulas y caballos que están disponibles normalmente en Termas del Plomo.

Acercas de instrumentación, al final de este proyecto quedan instaladas para la DGA una estación meteorológica automática (AWS) tipo GEUS en el glaciar Bello y otra en el glaciar Yeso. Se recomienda instalar una AWS en el glaciar Pirámide y otra AWS en el glaciar de rocas P, a la vez de instalar una estación hidrológica en una zona adecuada en cada efluente de los 3 glaciares.

7.3.3. Zona Sur

LA DGA ha realizado diversos estudios glaciológicos básicos en la Zona Sur, pero sin llegar a desarrollar un programa de monitoreo sistemático en la zona. El único glaciar que ha sido monitoreado en forma regular en la zona es el Mocho, ubicado en el versante suroriental del volcán Mocho-Choshuenco. Las mediciones en el volcán Mocho han estado patrocinadas desde 2003 por la Fundación Huilo Huilo, primero con apoyo del Centro de Estudios Científicos (CECs) y desde 2012 con apoyo de Geoestudios y de este actual proyecto de la DGA. Al final de este proyecto quedará reinstalada la estación hidrológica del glaciar Mocho y la estructura para instalar en el futuro instrumental meteorológico en el borde oriental del glaciar, junto con una estación meteorológica básica existente desde 2006. De modo de fortalecer y asegurar la continuidad de este programa de monitoreo se propone que la DGA incorpore este glaciar a su red de monitoreo. Se debería agregar en verano una AWS tipo GEUS sobre el glaciar. Con el fin de robustecer la capacidad técnica local, para lo cual se sugiere realizar talleres de capacitación, y por las propias facilidades logísticas en la zona, se sugiere realizar este monitoreo en colaboración con la Fundación Huilo Huilo, dueños del camino de acceso al glaciar, en la localidad de Neltume.

7.3.4. Zona Austral

Dada la extensión de la zona y de forma de asegurar la representatividad espacial, se propone incluir en el programa de monitoreo los siguientes 2 glaciares:

- Glaciar Exploradores, Campo de Hielo Patagónico Norte (CHPN), 86 km²
- Glaciar Tyndall, Campo de Hielo Patagónico Sur (CHPS), 328 km².

Debido al gran tamaño de los glaciares propuestos se torna muy complicado aplicar el método glaciológico tradicional a toda su área, por lo cual se propone solamente medir las zonas de ablación.

En el futuro se sugiere iniciar el monitoreo de 2 glaciares pequeños (menos de 5 km²) aledaños al CHPN (1) y al CHPS (1), que probablemente tienen un comportamiento distinto a los grandes glaciares de los campos de hielo de la Patagonia, y que servirían de modelo para entender el comportamiento de numerosos glaciares pequeños de montaña

existentes en la zona. Una ventaja de estudiar estos glaciares más pequeños es que se podría cubrir tanto la zona de acumulación como la zona de ablación. En la literatura, un buen ejemplo de monitoreo de un glaciar pequeño es el glaciar de los Tres en la zona del Monte Fitz Roy, Patagonia argentina (Popovnin et al., 1999). Existen numerosos glaciares pequeños en la Patagonia chilena, aledaños al CHPN y al CHPS, que podrían servir como glaciares piloto de monitoreo. Lo óptimo sería elegir uno en la fachada oriental y otro en la fachada occidental para aprovechar de evaluar diferencias regionales de las condiciones climáticas y glaciológicas.

7.3.4.1. **Glaciar Exploradores**

En el glaciar Exploradores, japoneses, investigadores del Centro de Investigación en Ecosistemas de la Patagonia (CIEP) y también la DGA han realizado mediciones glaciológicas e hidrológicas de detalle. En este proyecto se habilitó la transmisión de una AWS tipo GEUS existente sobre el glaciar Exploradores. El acceso a la zona baja del glaciar Exploradores es muy expedito, estando el frente del glaciar a menos de 1 km del camino a Bahía Exploradores.

Con el fin de robustecer la capacidad técnica local, para lo cual se sugiere realizar talleres de capacitación, y por las propias facilidades logísticas en la zona, se sugiere realizar este monitoreo en colaboración con el CIEP y el operador logístico Centro de Ecoturismo El Puesto, este último como dueños de una infraestructura (refugio y camino en el bosque) en la zona frontal del glaciar.

7.3.4.2. **Glaciar Tyndall**

En el glaciar Tyndall, japoneses, norteamericanos y también la DGA han realizado mediciones glaciológicas e hidrológicas de detalle, particularmente en una transecta ubicada a cota 600 m en la zona de ablación. En este proyecto se habilitó la transmisión de una AWS tipo GEUS existente sobre el glaciar Tyndall. El acceso a la zona baja del glaciar Tyndall es relativamente expedito, llegando en vehículo a la Guardería Grey, Parque Nacional Torres del Paine, y desde ahí a pie o a caballo una distancia de 20 km al campamento base a los pies del Lóbulo Zapata del glaciar Tyndall.

Con el fin de robustecer la capacidad técnica local, para lo cual se sugiere realizar talleres de capacitación, y por las propias facilidades logísticas en la zona, se sugiere realizar este monitoreo en colaboración con la Universidad de Magallanes.

7.4. ANÁLISIS CRÍTICO DE LA ESTRATEGIA NACIONAL DE GLACIARES

Finalmente, creemos que es necesario efectuar, a 4 años de su publicación, un análisis crítico de la Estrategia Nacional de Glaciares (ENG) y su implementación en Chile, junto con evaluar los avances y limitaciones del marco técnico y jurídico ambiental chileno en lo referente a glaciares. Ello con el propósito de identificar medidas tendientes a poder perfeccionar la ENG y el marco legal ambiental asociado. Por ejemplo potenciales aspectos de tal análisis necesariamente debiera cubrir las metodologías actualmente en uso, la definición de zonas glaciológicas y de niveles de estudio de glaciares, y el marco regulatorio de actividades en las cercanías de los glaciares, incluyendo la Ley de Bases de Medio Ambiente, la Política de Glaciares, el Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental, y la necesidad de una Guía Metodológica para llevar a cabo un estudio de línea base y de evaluación de impacto ambiental relativo a glaciares.

8. SEGURIDAD DEL TRABAJO

A continuación se describen los protocolos de prevención de riesgos y seguridad del trabajo implementados en Geoestudios para este proyecto.

8.1. ANÁLISIS DE SEGURIDAD EN EL TRABAJO (AST)

Para cada glaciar se preparó un Análisis de Seguridad en el Trabajo (AST) que describe los riesgos y las medidas de control asociadas.

8.1.1. Glaciar Bello

	PREVENCIÓN DE RIESGOS	AST-Glaciar Bello
	ANÁLISIS DE SEGURIDAD EN EL TRABAJO (AST)	

Campana/Lugar de trabajo	Glaciar Bello	AST PREPARADO POR Asesor en Seguridad	Claudia Schönfeldt Palma Registro Servicio Nacional de Salud ARAU-P/0279
TRABAJO A REALIZAR	Instalación e Implementación de datos en estación meteor. GEUS Instalación/Medición de balizas ablación/Velocidad Medición de densidad en pozo estratigráfico.		

SECUENCIA DE TRABAJO	RIESGOS (PELIGRO /CONSECUENCIAS, IMPACTOS A SEGURIDAD, SALUD, AMBIENTAL Y CALIDAD)	MEDIDAS DE CONTROL
Reunión previa con el personal participante	Desconocimiento de la tarea a realizar Mala comunicación del supervisor	Se hará un análisis detallado de las actividades a realizar por parte del jefe de faena (Art. 21 D.S. N°40). Realizar HCR y charla de 5 minutos antes de empezar las actividades.
Movilización del personal en vehículos	Colisión en vías urbanas Manejo en estado de intemperancia Choques,	El conductor del vehículo deberá exigir el uso de cinturón de seguridad a sus acompañantes. El manejo del vehículo se realizará a la defensiva y respetando todas las señalizaciones del tránsito. Designar un conductor responsable. Cuando el traslado del personal se realice en helicóptero, se debe seguir y cumplir las normas del instructivo que dicte el piloto del helicóptero antes del vuelo.

	colisiones, lesiones graves, muerte(s)	<p>Antes de ingresar a la zona de trabajo, el operador y/o chofer deberá verificar el entorno del trabajo.</p> <p>Si los espacios son reducidos para realizar maniobras de viraje, deberá utilizar un señalero.</p>
Carga y descarga de materiales	<p>Atrapamiento</p> <p>Sobreesfuerzo</p>	<p>Mantener y usar técnicas adecuadas para mover objetos. Solicitar ayuda cuando sea necesario.</p> <p>En el caso de usar animales no sobrecargar el caballo/mula con la carga, mantener una distancia prudente entre el trabajador y el caballo/mula.</p>
Traslado del personal desde la base/hacia los puntos de trabajo	<p>Caídas a nivel</p> <p>Caídas a distinto nivel</p> <p>Exposición a bajas temperaturas</p> <p>Exposición a radiación UV y deshidratación</p> <p>Sobreesfuerzo</p>	<p>Caminar a paso firme, con carga de materiales en mochilas para mantener las manos libres. Uso de bastones cuando sea necesario y elementos de protección principal (E.P.P.).</p> <p>Contar con los implementos de seguridad que requiera el terreno tales como arnés, piolet, etc. Evaluar el terreno por el que se transita Uso de calzado apropiado para el terreno y utilización de casco de escalada.</p> <p>Utilizar ropa de abrigo.</p> <p>Usar bloqueador solar, aplicar 30 minutos antes de exponerse al sol, usar lentes de sol con filtro UV-A y UV-B, y beber agua en forma permanente.</p> <p>Mantener y usar técnicas adecuadas para transportar carga. Solicitar ayuda cuando sea necesario.</p>
Instalación de balizas	<p>Caídas a nivel</p> <p>Golpes</p> <p>Exposición a bajas temperaturas</p> <p>Exposición a radiación UV y deshidratación</p>	<p>Mantener la zona de trabajo limpia y ordenada.</p> <p>Utilizar las herramientas adecuadas y los E.P.P.</p> <p>Utilizar ropa de abrigo.</p> <p>Usar bloqueador solar, aplicar 30 minutos antes de exponerse al sol, beber agua en forma permanente y usar lentes de sol con filtro UV-A y UV-B.</p>
Medición de balizas/velocidades	Caídas a nivel	Caminar a paso firme, con carga de materiales en mochilas para mantener las manos libres. Uso de

	<p>Golpes</p> <p>Exposición a temperaturas extremas</p> <p>Exposición a radiación UV y deshidratación</p>	<p>bastones cuando sea necesario y E.P.P.</p> <p>Utilizar las herramientas adecuadas y los E.P.P.</p> <p>Utilizar ropa de abrigo.</p> <p>Usar bloqueador solar, aplicar 30 minutos antes de exponerse al sol, beber agua en forma permanente y usar lentes de sol con filtro UV-A y UV-B.</p>
<p>Instalación/Implementación de una estación meteorológica GEUS</p>	<p>Caídas a nivel</p> <p>Golpes</p> <p>Sobreesfuerzo</p> <p>Exposición a bajas temperaturas</p> <p>Exposición a radiación UV y deshidratación</p>	<p>Caminar a paso firme, con carga de materiales en mochilas para mantener las manos libres. Uso de bastones, cuando sea necesario y E.P.P.</p> <p>Utilizar las herramientas adecuadas y los E.P.P.</p> <p>Usar técnicas adecuadas para mover objetos. Solicitar ayuda cuando sea necesario.</p> <p>Utilizar ropa de abrigo.</p> <p>Usar bloqueador solar, aplicar 30 minutos antes de exponerse al sol, usar lentes de sol con filtro UV-A y UV-B y beber agua en forma permanente.</p>
<p>Medición de un pozo estratigráfico</p>	<p>Caídas a nivel</p> <p>Caídas a distinto nivel</p> <p>Golpes</p> <p>Exposición a bajas temperaturas</p> <p>Exposición a radiación UV y deshidratación</p>	<p>Caminar a paso firme, con carga de materiales en mochilas para mantener las manos libres. Uso de bastones cuando sea necesario y E.P.P.</p> <p>Delimitar el acceso de ingreso y salida del pozo para evitar caídas.</p> <p>Utilizar las herramientas adecuadas y los E.P.P.</p> <p>Utilizar ropa de abrigo.</p> <p>Usar bloqueador solar, aplicar 30 minutos antes de exponerse al sol, usar lentes de sol con filtro UV- A y UV- B, y beber agua en forma permanente.</p>

8.1.2. Glaciar Yeso

	PREVENCIÓN DE RIESGOS	AST Glaciar Yeso
	ANÁLISIS DE SEGURIDAD EN EL TRABAJO (AST)	

Campania/Lugar de trabajo	Glaciar Yeso	AST PREPARADO POR Asesor en Seguridad	C l a u d i a S c h ö n f f e l d t Registro Servicio Nacional de Salud A R A U - P / 0 2 7 9
TRABAJO A REALIZAR	Medición de balizas de ablación y velocidad Inst./implement. de datos estac. Met. GEUS Inst. Meteorolog. Trípode Desarme de campamento.		

SECUENCIA DE TRABAJO	RIESGOS (PELIGRO /CONSECUENCIAS, IMPACTOS A SEGURIDAD, SALUD, AMBIENTAL Y CALIDAD	MEDIDAS DE CONTROL
Reunión previa con el personal participante	Desconocimiento de la tarea a realizar. Mala comunicación del supervisor	Se hará análisis detallado de las actividades a realizar por parte del jefe de faena. (art.21 D.S.N°40). Realizar HCR y charla de 5 minutos antes de empezar las actividades.
Movilización del personal en vehículos	Colisión en vías urbanas Manejo en estado de intemperancia Choques, colisiones, lesiones graves, muerte (s)	El conductor del vehículo deberá exigir el uso de cinturón de seguridad a sus acompañantes. El manejo del vehículo se realizara a la defensiva y respetando todas las señalizaciones del tránsito. Designar a un conductor responsable. Cuando el traslado del personal se realice en helicóptero, se debe seguir y cumplir las normas del instructivo que dicte el piloto del helicóptero, antes del vuelo. Antes de ingresar a la zona de trabajo, el operador y/o chofer deberá verificar en entorno del trabajo. Si los espacios son reducidos para realizar maniobras

		de viraje, deberá utilizar un señalero.
Carga y descarga de materiales	Atrapamiento Sobreesfuerzo	No sobrecargar el caballo/mula con la carga, mantener una distancia prudente entre trabajador y el caballo/mula. Mantener Usar técnicas adecuadas para mover objetos. Solicitar ayuda cuando sea necesario.
Traslado del personal desde la base/hacia los puntos de trabajo	Caídas a nivel Caídas a distinto nivel Exposición a bajas temperaturas Exposición a radiación UV y deshidratación Sobreesfuerzo	Caminar a paso firme, con carga de materiales en mochilas para evitar que las manos vayan ocupadas. Uso de bastones, cuando sea necesario y E.P.P. Contar con los implementos de seguridad que requiera el terreno tales como arnés, piole, etc. Evaluar el terreno por el que se transita. Uso de calzado apropiado para el terreno y utilización de casco de escalada. Utilizar ropa de abrigo. Usar bloqueador solar, aplicar 30 minutos antes de exponerse al sol, beber agua en forma permanente y usar lentes de sol con filtro UV- A y UV- B. Mantener Usar técnicas adecuadas para mover objetos. Solicitar ayuda cuando sea necesario.
Instalación de balizas	Caídas a nivel Golpes Exposición a bajas temperaturas Exposición a radiación UV y deshidratación	Mantener la zona de trabajo limpia y ordenada. Utilizar la herramienta adecuada y los elementos de protección personal. Utilizar ropa de abrigo. Usar bloqueador solar, aplicar 30 minutos antes de exponerse al sol, beber agua en forma permanente y usar lentes de sol con filtro UV- A y UV- B.
Medición de Balizas/Velocidades	Caídas a Nivel Golpes Exposición a temperaturas extremas Exposición Radiación UV y deshidratación	Caminar a paso firme, con carga de materiales en mochilas para evitar que las manos vayan ocupadas. Uso de bastones, cuando sea necesario y E.P.P. Utilizar la herramienta adecuada y los elementos de protección personal. Utilizar ropa de abrigo. Usar bloqueador solar, aplicar 30 minutos antes de exponerse al sol, beber agua en forma permanente y usar lentes de sol con filtro UV- A y UV- B
Instalación/Implementación de la estación Meteorológica GEUS	Caídas a nivel	Caminar a paso firme, con carga de materiales en mochilas para evitar que las manos vayan ocupadas. Uso de bastones, cuando sea necesario y E.P.P.

	<p>Golpes</p> <p>Sobreesfuerzo</p> <p>Exposición a bajas temperaturas</p> <p>Exposición a radiación UV y deshidratación</p>	<p>Utilizar la herramienta adecuada y los elementos de protección personal.</p> <p>Usar técnicas adecuadas para mover objetos. Solicitar ayuda cuando sea necesario.</p> <p>Utilizar ropa de abrigo.</p> <p>Usar bloqueador solar, aplicar 30 minutos antes de exponerse al sol, beber agua en forma permanente y usar lentes de sol con filtro UV- A y UV- B.</p>
<p>Instalación estación meteorológica</p> <p>Trípode</p>	<p>Caídas a nivel</p> <p>Caídas a distinto nivel</p> <p>Golpes</p> <p>Exposición a bajas temperaturas</p> <p>Exposición a radiación UV y deshidratación</p>	<p>Caminar a paso firme, con carga de materiales en mochilas para evitar que las manos vayan ocupadas. Uso de bastones, cuando sea necesario y E.P.P.</p> <p>Fijar el acceso de ingreso y salida del pozo, para evitar caídas.</p> <p>Utilizar la herramienta adecuada.</p> <p>Utilizar ropa de abrigo.</p> <p>Usar bloqueador solar, aplicar 30 minutos antes de exponerse al sol, beber agua en forma permanente y usar lentes de sol con filtro UV- A y UV- B.</p>
<p>Desarme</p> <p>Campamento</p>	<p>Caídas a nivel</p> <p>Caídas a distinto nivel</p> <p>Golpes</p> <p>Exposición a bajas temperaturas.</p> <p>Exposición a radiación UV y deshidratación</p> <p>Sobreesfuerzo</p>	<p>Caminar a paso firme, con carga de materiales en mochilas para evitar que las manos vayan ocupadas. Uso de bastones, cuando sea necesario y E.P.P.</p> <p>Fijar el acceso de ingreso y salida del pozo, para evitar caídas.</p> <p>Utilizar la herramienta adecuada.</p> <p>Utilizar ropa de abrigo.</p> <p>Usar bloqueador solar, aplicar 30 minutos antes de exponerse al sol, beber agua en forma permanente y usar lentes de sol con filtro UV- A y UV- B.</p> <p>Usar técnicas adecuadas para mover objetos. Solicitar ayuda cuando sea necesario.</p>

8.1.3. Glaciar Mocho-Choshuenco

	PREVENCIÓN DE RIESGOS	AST Vocán Mocho-Choshuenco
	ANÁLISIS DE SEGURIDAD EN EL TRABAJO (AST)	

Campana/Lugar de trabajo	Volcán Mocho-Choshuenco	AST PREPARADO POR Asesor en Seguridad	C l a u d i a S c h ö n f f e l d Registro Servicio Nacional de Salud A R A U - P / 0 2 7
TRABAJO A REALIZAR	Mantenimiento/control estación Fluviométrica Instalación estación Meteorológica Mantenimiento/medición Balizas de Ablación Medición de densidad en pozo estatigráfico Desarme de campamento.		

SECUENCIA DE TRABAJO	RIESGOS (PELIGRO /CONSECUENCIAS, IMPACTOS A SEGURIDAD, SALUD, AMBIENTAL Y CALIDAD	MEDIDAS DE CONTROL
Reunión previa con el personal participante	Desconocimiento de la tarea a realizar. Mala comunicación del supervisor	Se hará análisis detallado de las actividades a realizar por parte del jefe de faena. (art.21 D.S.N°40). Realizar HCR y charla de 5 minutos antes de empezar las actividades.

Movilización del personal en vehículos	<p>Colisión en vías urbanas</p> <p>Manejo en estado de intemperancia</p> <p>Choques, colisiones, lesiones graves y muerte (s)</p>	<p>El conductor del vehículo deberá exigir el uso de cinturón de seguridad a sus acompañantes.</p> <p>El manejo del vehículo se realizara a la defensiva y respetando todas las señalizaciones del tránsito. Designar a un conductor responsable.</p> <p>Cuando el traslado del personal se realice en helicóptero, se debe seguir y cumplir las normas del instructivo que dicte el piloto del helicóptero, antes del vuelo. Antes de ingresar a la zona de trabajo, el operador y/o chofer deberá verificar en entorno del trabajo. Si los espacios son reducidos para realizar maniobras de viraje, deberá utilizar un señalero.</p>
Carga y descarga de materiales	<p>Atrapamiento</p> <p>Sobreesfuerzo</p>	<p>No sobrecargar el caballo/mula con la carga, mantener una distancia prudente entre trabajador y el caballo/mula.</p> <p>Mantener Usar técnicas adecuadas para mover objetos. Solicitar ayuda cuando sea necesario.</p>
Traslado del personal desde la base/hacia los puntos de trabajo	<p>Caídas a nivel</p> <p>Caídas a distinto nivel</p> <p>Exposición a bajas temperaturas</p> <p>Exposición a radiación UV y deshidratación</p> <p>Sobreesfuerzo</p>	<p>Caminar a paso firme, con carga de materiales en mochilas para evitar que las manos vayan ocupadas. Uso de bastones, cuando sea necesario y E.P.P.</p> <p>Evaluar el terreno por el que se transita. Contar con los implementos de seguridad que requiera el terreno tales como arnés, piole, etc. Caminar encordados para evitar caídas en grietas. Si se utilizan motos de nieve para los traslados, se debe chequear el trayecto y en caso que existan grietas las motos de nieve deben ir amarradas entre estas. Uso de calzado apropiado para el terreno y utilización de casco de escalada.</p> <p>Utilizar ropa de abrigo.</p> <p>Usar bloqueador solar, aplicar 30 minutos antes de exponerse al sol, beber agua en forma permanente y usar lentes de sol con filtro UV- A y UV- B.</p> <p>Mantener Usar técnicas adecuadas para mover objetos. Solicitar ayuda cuando sea necesario.</p>
Mantenimiento/medición de balizas ablación	<p>Caídas a nivel</p> <p>Golpes</p>	<p>Mantener la zona de trabajo limpia y ordenada.</p> <p>Utilizar la herramienta adecuada y los elementos de protección personal.</p>

	Exposición a bajas temperaturas Exposición a radiación UV y deshidratación	Utilizar ropa de abrigo. Usar bloqueador solar, aplicar 30 minutos antes de exponerse al sol, beber agua en forma permanente y usar lentes de sol con filtro UV- A y UV- B.
Mantenimiento/Control de las estaciones Meteorológicas existentes.	Caídas a Nivel Golpes Exposición a temperaturas extremas Exposición Radiación UV y deshidratación	Mantener la zona de trabajo limpia y ordenada. Utilizar la herramienta adecuada y los elementos de protección personal. Utilizar ropa de abrigo. Usar bloqueador solar, aplicar 30 minutos antes de exponerse al sol, beber agua en forma permanente y usar lentes de sol con filtro UV- A y UV- B
Medición/control estación Fluviométrica	Caídas a nivel Golpes Sobreesfuerzo Exposición a bajas temperaturas. Exposición a radiación UV y deshidratación	Mantener la zona de trabajo limpia y ordenada. Utilizar la herramienta adecuada y los elementos de protección personal. Usar técnicas adecuadas para mover objetos. Solicitar ayuda cuando sea necesario. Utilizar ropa de abrigo. Usar bloqueador solar, aplicar 30 minutos antes de exponerse al sol, beber agua en forma permanente y usar lentes de sol con filtro UV- A y UV- B.
Medición de densidad en pozo estratigráfico	Caídas a nivel Golpes Exposición a bajas temperaturas Exposición a radiación UV y deshidratación	Mantener limpia y ordenada la zona de trabajo. Utilizar la herramienta adecuada. Utilizar ropa de abrigo. Usar bloqueador solar, aplicar 30 minutos antes de exponerse al sol, beber agua en forma permanente y usar lentes de sol con filtro UV- A y UV- B.
Desarme Campamento	Caídas a nivel Caídas a distinto nivel	Mantener limpio y ordenado los equipos/herramientas para evitar caídas en el lugar. Fijar el acceso de ingreso y salida del pozo, para evitar caídas.

	<p>Golpes</p> <p>Exposición a bajas temperaturas.</p> <p>Exposición a radiación UV y deshidratación</p> <p>Sobreesfuerzo</p>	<p>Utilizar la herramienta adecuada.</p> <p>Utilizar ropa de abrigo.</p> <p>Usar bloqueador solar, aplicar 30 minutos antes de exponerse al sol, beber agua en forma permanente y usar lentes de sol con filtro UV- A y UV- B.</p> <p>Usar técnicas adecuadas para mover objetos. Solicitar ayuda cuando sea necesario.</p>
--	--	---

8.1.4. Glaciar Exploradores

	PREVENCIÓN DE RIESGOS	AST Glaciar Exploradores
	ANÁLISIS DE SEGURIDAD EN EL TRABAJO (AST)	

Campana/Lugar de trabajo	Glaciar Exploradores	AST PREPARADO POR Asesor en Seguridad	Claudia Schonfeldt Registro Servicio Nacional A R A U - P / C
TRABAJO A REALIZAR	Descarga de datos/Mant. estación Meteorológica GEUS Implementac. Transmisión de datos est.GEUS Instalación/medición de balizas/Velocidad		

SECUENCIA DE TRABAJO	RIESGOS (PELIGRO /CONSECUENCIAS, IMPACTOS A SEGURIDAD, SALUD, AMBIENTAL Y CALIDAD	MEDIDAS DE CONTROL
Reunión previa con el personal participante	Desconocimiento de la tarea a realizar. Mala comunicación del supervisor	Se hará análisis detallado de las actividades a realizar por parte del jefe de faena. (art.21 D.S.N°40). Realizar HCR y charla de 5 minutos antes de empezar las actividades.
Movilización del personal en vehículos	Colisión en vías urbanas. Manejo en estado de intemperancia. Choques, colisiones, lesiones graves y muerte (s)	El conductor del vehículo deberá exigir el uso de cinturón de seguridad a sus acompañantes. El manejo del vehículo se realizara a la defensiva y respetando todas las señalizaciones del tránsito. Designar a un conductor responsable. Cuando el traslado del personal se realice en helicóptero, se debe

		<p>seguir y cumplir las normas del instructivo que dicte el piloto del helicóptero, antes del vuelo.</p> <p>Antes de ingresar a la zona de trabajo, el operador y/o chofer deberá verificar en entorno del trabajo. Si los espacios son reducidos para realizar maniobras de viraje, deberá utilizar un señalero.</p>
Carga y descarga de materiales	<p>Atrapamiento</p> <p>Sobreesfuerzo</p>	<p>No sobrecargar el caballo/Mula con la carga, mantener una distancia prudente entre trabajador y el caballo.</p> <p>Mantener Usar técnicas adecuadas para mover objetos. Solicitar ayuda cuando sea necesario.</p>
Traslado del personal desde la base y a los puntos de trabajo	<p>Caídas a nivel</p> <p>Caídas a distinto nivel</p> <p>Exposición a bajas temperaturas.</p> <p>Exposición a radiación UV y deshidratación</p> <p>Sobreesfuerzo</p>	<p>Caminar a paso firme, con carga de materiales en mochilas para evitar que las manos vayan ocupadas. Uso de bastones, cuando sea necesario y E.P.P.</p> <p>Contar con los implementos de seguridad que requiera el terreno tales como arnés, piole, etc.</p> <p>Evaluar el terreno por el que se transita</p> <p>Uso de calzado apropiado para el terreno y utilización de casco de escalada.</p> <p>Utilizar ropa de abrigo.</p> <p>Usar bloqueador solar, aplicar 30 minutos antes de exponerse al sol, beber agua en forma permanente y usar lentes de sol con filtro UV- A y</p>

		<p>UV- B.</p> <p>Mantener Usar técnicas adecuadas para mover objetos. Solicitar ayuda cuando sea necesario.</p>
<p>Instalación de balizas de PVC en la perforación</p>	<p>Caídas a nivel</p> <p>Golpes</p> <p>Exposición a bajas temperaturas.</p> <p>Exposición a radiación UV y deshidratación</p>	<p>Mantener la zona de trabajo limpia y ordenada.</p> <p>Utilizar la herramienta adecuada y los elementos de protección personal.</p> <p>Utilizar ropa de abrigo.</p> <p>Usar bloqueador solar, aplicar 30 minutos antes de exponerse al sol, beber agua en forma permanente y usar lentes de sol con filtro UV- A y UV- B.</p>
<p>Medir Balizas con huincha</p>	<p>Caídas a nivel</p>	<p>Mantener la zona de trabajo limpia y ordenada.</p>
<p>Medición de posición con GPS diferencial</p>	<p>Caídas a nivel</p> <p>Golpes</p> <p>Exposición a bajas temperaturas.</p> <p>Exposición a radiación UV y deshidratación</p>	<p>Caminar a paso firme, con carga de materiales en mochilas para evitar que las manos vayan ocupadas. Uso de bastones, cuando sea necesario y E.P.P.</p> <p>Utilizar la herramienta adecuada y los elementos de protección personal.</p> <p>Utilizar ropa de abrigo.</p> <p>Usar bloqueador solar, aplicar 30 minutos antes de exponerse al sol, beber agua en forma permanente y usar lentes de sol con filtro UV- A y UV- B.</p>
<p>Instalación de GPS Base</p>	<p>Caídas a nivel</p>	<p>Caminar a paso firme, con carga de materiales en mochilas para evitar que las manos vayan ocupadas. Uso de</p>

	<p>Golpes</p> <p>Sobreesfuerzo</p> <p>Exposición a bajas temperaturas</p> <p>Exposición a radiación UV y deshidratación</p>	<p>bastones, cuando sea necesario y E.P.P.</p> <p>Utilizar la herramienta adecuada y los elementos de protección personal.</p> <p>Usar técnicas adecuadas para mover objetos. Solicitar ayuda cuando sea necesario.</p> <p>Utilizar ropa de abrigo.</p> <p>Usar bloqueador solar, aplicar 30 minutos antes de exponerse al sol, beber agua en forma permanente y usar lentes de sol con filtro UV- A y UV- B.</p>
Desplazamiento hacia los puntos de medición sobre el glaciar	<p>Caídas a nivel</p> <p>Caídas a distinto nivel</p> <p>Exposición a bajas temperaturas.</p> <p>Exposición a radiación UV y deshidratación</p>	<p>Caminar a paso firme, con carga de materiales en mochilas para evitar que las manos vayan ocupadas. Uso de bastones, cuando sea necesario y E.P.P.</p> <p>Contar con los implementos de seguridad que requiera el terreno tales como arnés, piole, etc. Evaluar el terreno por el que se transita. Uso de calzado apropiado para el terreno y utilización de casco de escalada. Utilizar Equipo de montaña y elementos de protección personal.</p> <p>Utilizar ropa de abrigo.</p> <p>Usar bloqueador solar, aplicar 30 minutos antes de exponerse al sol, beber agua en forma permanente y usar lentes de sol con filtro UV- A y UV- B.</p>
Medición de posición con GPS diferencial	Caídas a nivel	Caminar a paso firme, con carga de materiales

	<p>Golpes</p> <p>Exposición a bajas temperaturas.</p> <p>Exposición a radiación UV y deshidratación</p>	<p>en mochilas para evitar que las manos vayan ocupadas. Uso de bastones, cuando sea necesario y E.P.P.</p> <p>Utilizar la herramienta adecuada y los elementos de protección personal.</p> <p>Utilizar ropa de abrigo.</p> <p>Usar bloqueador solar, aplicar 30 minutos antes de exponerse al sol, beber agua en forma permanente y usar lentes de sol con filtro UV- A y UV- B.</p>
Descarga de datos/Mantención estación meteorológica GEUS	<p>Caídas a nivel</p> <p>Exposición a bajas temperaturas.</p> <p>Exposición a radiación y deshidratación</p>	<p>Mantener limpio y ordenado de equipos y herramientas las zonas de trabajo para evitar caídas.</p> <p>Usar Ropa de abrigo.</p> <p>Usar bloqueador solar, aplicar 30 minutos antes de exponerse al sol, beber agua en forma permanente y usar lentes de sol con filtro UV- A y UV- B.</p>
Implementación Transmisión de datos estación GEUS	<p>Caídas a nivel</p> <p>Exposición a bajas temperaturas.</p> <p>Exposición a radiación UV y deshidratación.</p>	<p>Mantener limpio y ordenado de equipos y herramientas las zonas de trabajo para evitar caídas.</p> <p>Usar Ropa de abrigo.</p> <p>Usar bloqueador solar, aplicar 30 minutos antes de exponerse al sol, beber agua en forma permanente y usar lentes de sol con filtro UV- A y UV- B.</p>
Desarme de campamento	<p>Caídas a nivel</p> <p>Caídas a distinto nivel</p>	<p>Mantener limpio y ordenado los equipos/herramientas para evitar caídas en el lugar.</p>

	<p>Golpes</p> <p>Exposición a bajas temperaturas.</p> <p>Exposición a radiación UV y deshidratación</p> <p>Sobreesfuerzo</p>	<p>Fijar el acceso de ingreso y salida del pozo, para evitar caídas.</p> <p>Utilizar la herramienta adecuada.</p> <p>Utilizar ropa de abrigo.</p> <p>Usar bloqueador solar, aplicar 30 minutos antes de exponerse al sol, beber agua en forma permanente y usar lentes de sol con filtro UV- A y UV- B.</p> <p>Usar técnicas adecuadas para mover objetos. Solicitar ayuda cuando sea necesario.</p>
--	--	--

8.1.5. Glaciar Tyndall

	PREVENCIÓN DE RIESGOS	AST Glaciar Tyndall
	ANÁLISIS DE SEGURIDAD EN EL TRABAJO (AST)	

Campaña/Lugar de trabajo	Glaciar Tyndall	AST PREPARADO POR Asesor en Seguridad	Claudia Schönfeldt. Registro Servicio Nacional de Salud A R A U - P / 0 2 7 9
TRABAJO A REALIZAR	Descarga de datos/Mant. estación Meteorológica GEUS Implementac. Transmisión de datos est.GEUS Instalación/medición de balizas/Velocidad Revisión de datos cámaras secuenciales		

SECUENCIA DE TRABAJO	RIESGOS (PELIGRO /CONSECUENCIAS, IMPACTOS A SEGURIDAD, SALUD, AMBIENTAL Y CALIDAD	MEDIDAS DE CONTROL
Reunión previa con el personal participante	Desconocimiento de la tarea a realizar Mala comunicación del supervisor	Se hará análisis detallado de las actividades a realizar por parte del jefe de faena. (art.21 D.S.N°40). Realizar HCR y charla de 5 minutos antes de empezar las actividades.
Movilización del personal en vehículos	Colisión en vías urbanas Manejo en estado de intemperancia Choques, colisiones, lesiones graves y muerte (s)	El conductor del vehículo deberá exigir el uso de cinturón de seguridad a sus acompañantes. El manejo del vehículo se realizara a la defensiva y respetando todas las señalizaciones del tránsito. Designar a un conductor responsable.

		<p>Cuando el traslado del personal se realice en helicóptero, se debe seguir y cumplir las normas del instructivo que dicte el piloto del helicóptero, antes del vuelo.</p> <p>Antes de ingresar a la zona de trabajo, el operador y/o chofer deberá verificar en entorno del trabajo.</p> <p>Si los espacios son reducidos para realizar maniobras de viraje, deberá utilizar un señalero.</p>
Carga y descarga de materiales	<p>Atrapamiento</p> <p>Sobreesfuerzo</p>	<p>No sobrecargar el caballo/Mula con la carga, mantener una distancia prudente entre trabajador y el caballo.</p> <p>Mantener Usar técnicas adecuadas para mover objetos. Solicitar ayuda cuando sea necesario.</p>
Traslado del personal desde la base y a los puntos de trabajo	<p>Caídas a nivel</p> <p>Caídas a distinto nivel</p> <p>Exposición a bajas temperaturas</p> <p>Exposición a radiación UV y deshidratación</p> <p>Sobreesfuerzo</p>	<p>Caminar a paso firme, con carga de materiales en mochilas para evitar que las manos vayan ocupadas. Uso de bastones, cuando sea necesario y E.P.P.</p> <p>Contar con los implementos de seguridad que requiera el terreno tales como arnés, piole, etc.</p> <p>Evaluar el terreno por el que se transita</p> <p>Uso de calzado apropiado para el terreno y utilización de casco de escalada.</p> <p>Utilizar ropa de abrigo.</p> <p>Usar bloqueador solar, aplicar 30 minutos antes</p>

		<p>de exponerse al sol, beber agua en forma permanente y usar lentes de sol con filtro UV- A y UV- B.</p> <p>Mantener Usar técnicas adecuadas para mover objetos. Solicitar ayuda cuando sea necesario.</p>
Instalación de balizas de PVC en la perforación	<p>Caídas a nivel</p> <p>Golpes</p> <p>Exposición a bajas temperaturas</p> <p>Exposición a radiación UV y deshidratación</p>	<p>Mantener la zona de trabajo limpia y ordenada.</p> <p>Utilizar la herramienta adecuada y los elementos de protección personal.</p> <p>Utilizar ropa de abrigo.</p> <p>Usar bloqueador solar, aplicar 30 minutos antes de exponerse al sol, beber agua en forma permanente y usar lentes de sol con filtro UV- A y UV- B.</p>
Medir Balizas con huincha	Caídas a nivel	Mantener la zona de trabajo limpia y ordenada.
Medición de posición con GPS diferencial	<p>Caídas a nivel</p> <p>Golpes</p> <p>Exposición a bajas temperaturas</p> <p>Exposición a radiación UV y deshidratación</p>	<p>Caminar a paso firme, con carga de materiales en mochilas para evitar que las manos permanezcan ocupadas. Uso de bastones, cuando sea necesario y E.P.P.</p> <p>Utilizar la herramienta adecuada y los elementos de protección personal.</p> <p>Utilizar ropa de abrigo.</p> <p>Usar bloqueador solar, aplicar 30 minutos antes de exponerse al sol, beber agua en forma permanente y usar lentes de sol con filtro UV- A y UV- B.</p>

<p>Instalación de GPS Base</p>	<p>Caídas a nivel</p> <p>Golpes</p> <p>Sobreesfuerzo</p> <p>Exposición a bajas temperaturas</p> <p>Exposición a radiación UV y deshidratación</p>	<p>Caminar a paso firme, con carga de materiales en mochilas para evitar que las manos vallan ocupadas. Uso de bastones, cuando sea necesario y E.P.P.</p> <p>Utilizar la herramienta adecuada y los elementos de protección personal.</p> <p>Usar técnicas adecuadas para mover objetos. Solicitar ayuda cuando sea necesario.</p> <p>Utilizar ropa de abrigo.</p> <p>Usar bloqueador solar, aplicar 30 minutos antes de exponerse al sol, beber agua en forma permanente y usar lentes de sol con filtro UV- A y UV- B.</p>
<p>Desplazamiento hacia los puntos de medición sobre el glaciar</p>	<p>Caídas a nivel</p> <p>Caídas a distinto nivel</p> <p>Exposición a bajas temperaturas</p> <p>Exposición a radiación UV y deshidratación</p>	<p>Caminar a paso firme, con carga de materiales en mochilas para evitar que las manos vallan ocupadas. Uso de bastones, cuando sea necesario y E.P.P.</p> <p>Contar con los implementos de seguridad que requiera el terreno tales como arnés, piole, etc. Evaluar el terreno por el que se transita</p> <p>Uso de calzado apropiado para el terreno y utilización de casco de escalada. Utilizar Equipo de montaña y elementos de protección personal.</p> <p>Utilizar ropa de abrigo.</p> <p>Usar bloqueador solar, aplicar 30 minutos antes de exponerse al sol,</p>

		<p>beber agua en forma permanente y usar lentes de sol con filtro UV- A y UV- B.</p>
<p>Medición de posición con GPS diferencial</p>	<p>Caídas a nivel</p> <p>Golpes</p> <p>Exposición a bajas temperaturas</p> <p>Exposición a radiación UV y deshidratación</p>	<p>Caminar a paso firme, con carga de materiales en mochilas para evitar que las manos permanezcan ocupadas. Uso de bastones, cuando sea necesario y E.P.P.</p> <p>Utilizar la herramienta adecuada y los elementos de protección personal.</p> <p>Utilizar ropa de abrigo.</p> <p>Usar bloqueador solar, aplicar 30 minutos antes de exponerse al sol, beber agua en forma permanente y usar lentes de sol con filtro UV- A y UV- B.</p>
<p>Descarga de datos/Mantención estación meteorológica GEUS</p>	<p>Caídas a nivel</p> <p>Exposición a bajas temperaturas</p> <p>Exposición a radiación UV y deshidratación</p>	<p>Mantener limpio y ordenado de equipos y herramientas las zonas de trabajo para evitar caídas.</p> <p>Usar ropa de abrigo.</p> <p>Usar bloqueador solar, aplicar 30 minutos antes de exponerse al sol, beber agua en forma permanente y usar lentes de sol con filtro UV- A y UV- B.</p>
<p>Implementación Transmisión de datos estación GEUS</p>	<p>Caídas a nivel</p> <p>Exposición a bajas temperaturas</p> <p>Exposición a radiación UV y deshidratación</p>	<p>Mantener limpio y ordenado de equipos y herramientas las zonas de trabajo para evitar caídas.</p> <p>Usar ropa de abrigo</p> <p>Usar bloqueador solar, aplicar 30 minutos antes de exponerse al sol,</p>

		<p>beber agua en forma permanente y usar lentes de sol con filtro UV- A y UV- B.</p>
<p>Revisión y descarga de datos cámaras secuenciales</p>	<p>Caídas a nivel</p> <p>Exposición a bajas temperaturas.</p> <p>Exposición a radiación UV y deshidratación</p>	<p>Mantener limpio y ordenado de equipos y herramientas las zonas de trabajo para evitar caídas.</p> <p>Usar ropa de abrigo.</p> <p>Usar bloqueador solar, aplicar 30 minutos antes de exponerse al sol, beber agua en forma permanente y usar lentes de sol con filtro UV- A y UV- B.</p>
<p>Desarme de campamento</p>	<p>Caídas a nivel</p> <p>Caídas a distinto nivel</p> <p>Golpes</p> <p>Exposición a bajas temperaturas</p> <p>Exposición a radiación UV y deshidratación</p> <p>Sobreesfuerzo</p>	<p>Mantener limpio y ordenado los equipos/herramientas para evitar caídas en el lugar.</p> <p>Fijar el acceso de ingreso y salida del pozo, para evitar caídas.</p> <p>Utilizar la herramienta adecuada.</p> <p>Utilizar ropa de abrigo.</p> <p>Usar bloqueador solar, aplicar 30 minutos antes de exponerse al sol, beber agua en forma permanente y usar lentes de sol con filtro UV- A y UV- B.</p> <p>Usar técnicas adecuadas para mover objetos. Solicitar ayuda cuando sea necesario.</p>

8.2. HOJA DE CONTROL DE RIESGOS

		HOJA DE CONTROL DE RIESGOS Y CHARLA DE 5 MINUTOS				
		QUIEN: SUPERVISORES O JEFES DE ÁREAS		TRABAJO:	FECHA	
AREA:				HORA DE INICIO		
RESPONSABLE DEL TRABAJO:				HORA DE TÉRMINO		
EMPRESA:		FIRMA:		TOT. CAPACITACIÓN		
A. PERSONAL		SI	NO	B. LUGAR DE TRABAJO	SI	NO
1. ESTAN CALIFICADOS PARA EL TRABAJO				1. SUPERFICIE DE TRABAJO SEGURA		
2. EXISTEN PROCEDIMIENTOS DE TRABAJO				2. ACCESOS EN BUENAS CONDICIONES		
3. SI EXISTE ¿LO CONOCE?				3. ESPACIO SUFICIENTE		
4. LO HA REALIZADO ANTES				4. ILUMINACIÓN ADECUADA		
5. CONOCE LA OPERACIÓN DEL EQUIPO/HERRAMIENTA				5. PROTECCIÓN ADECUADA (MECÁNICAS Y/O ELÉCTRICAS)		
6. BUENAS CONDICIONES FISICAS Y MENTALES				6. VENTILACIÓN SUFICIENTE		
7. SE DIO INSTRUCCIONES PARA EL(LOS) TRABAJO(S)				7. PARA COMENZAR EL TRABAJO EXISTE ORDEN Y ASEO		
C. EQUIPO Y HERRAMIENTA		SI	NO	D. BLOQUEOS REQUERIDOS (DONDE)		
1. EL EQUIPO ESTÁ EN BUENAS CONDICIONES				1.		
2. EQUIPO ADECUADO PARA EL TRABAJO				2.		
3. HERRAMIENTAS ADECUADAS				3.		
4. HERRAMIENTAS EN BUEN ESTADO				4.		
5. ACCESORIOS EN BUEN ESTADO (ESTROBOS, CORDELES, CADENAS, ETC.)				5.		
E. ACTOS Y/O CONDUCTAS SUBESTÁNDAR		SI	NO	PARA CADA NO INDIQUE MEDIDAS DE CONTROL		
1. TRABAJADORES TIENEN SUS EPP DE ACUERDO AL RIESGO DE LA TAREA						
2. SE CONSIDERÓ INCLUIR PROTECCIÓN PARA EL TRABAJO CON FUEGO (RIESGO DE INCENDIO)						
3. PROBAMOS QUE LOS BLOQUEOS SON EFECTIVOS ANTES DE INICIAR EL TRABAJO.						
4. LOS ACCESOS AL LUGAR DE TRABAJO SON ADECUADOS						

8.3. FLUJOGRAMA DE EMERGENCIAS



8.4. CAPACITACIÓN

Se adjunta un registro de ejemplo de capacitación.

		GEOESTUDIOS			
DIVISION:		AREA:		FECHA:	
RELATOR:				Hora Inicio:	
CARGO:				Hora Término:	
TEMAS TRATADOS:				Total Capacitación:	
Nombres y Apellidos:		RUT:		FIRMA:	
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					
13					
14					
15					
16					
17					
18					
19					
20					
Comentarios:					
NOTA: LOS FIRMANTES EN ESTA HOJA DECLARAMOS HABER RECIBIDO LAS INSTRUCCIONES DE ACUERDO AL ART. 23 DEL DECRETO SUPLENTO Nº 48 DE LA LEY 16.744					

9. **BIBLIOGRAFÍA**

AGUIRRE, L., HERVÉ, F., GODOY, E. 1972. Distribution of metamorphic facies in Chile, an outline. *Krystallinikum*, 9, 7-19.

ANIYA, M., ENOMOTO, H., AOKI, T., MATSUMOTO, T., SKVARCA, P., BARCAZA, G., SUZUKI, R., SAWAGAKI, T., SATO, N., ISENKO, E., IWASAKI, S., SALA, H., FUKUDA, A., SATOW, K., NARUSE, R. 2007. **Glaciological and geomorphological studies at Glaciar Exploradores, Hielo Patagónico Norte, and Glaciar Perito Moreno, Hielo Patagónico Sur, South America, during 2003–2005 (GRPP03-05)**. *Bull. Glaciol. Res.*, 24, 95–107.

ANIYA, M. 2001. **Glacier variations of Hielo Patagónico Norte, Chilean Patagonia, since 1944/45, with special reference to variations between 1995/96 and 1999/2000**. *Bulletin of Glaciological Research*, 18, 55–63.

ANIYA, M., SATO, H., NARUSE, R., SKVARCA, P., CASASSA, G. 1997. Recent glacier variations in the Southern Patagonia Icefield, South America. *Arctic and Alpine Research*, 29(1), 1-12.

BERNALES, M. 1990. *Toponimia de Valdivia*. Ediciones Universidad de La Frontera, 92 p. Temuco.

BEVERAGE, J. P. AND CULBERTSON, J. K. 1964. Hyperconcentrations of suspended sediment. *Journal of Hydraul. Div., Proc. Amer. Soc. Civ. Engrs.*, HY6, 117-128.

BOHM, M., LÜTH, S., ASCH, G., BATAILLE, K., BRUHN, C., RIETBROCK, A., WIGGER, P. 2002. The Southern Andes between 36°S and 40°S latitude: seismicity and average velocities. *Tectonophysics*, 356, 275-289.

BOLTON, D. 1980. The computation of equivalent potential temperature. *Mon. Wea. Rev.*, 108, 1046-1053.

BOWN, F., RIVERA, A., ACUÑA, C., CASASSA, G. 2007. Recent glacier mass balance calculations at Volcán Mocho-Choshuenco (40°S), Chilean Lake District. *IAHS Publ.* 318, 143-152.

BROCK, B.W. AND N.S. ARNOLD. 2000. A spreadsheet-based (MicrosoftExcel) point surface energy balance model for glacier and snowmelt studies. *Earth Surf. Process. Landf.*, 25(6), 649–658.

CAHILL, T., ISACKS, B., 1992. Seismicity and shape of the subducted Nazca plate. *Journal of Geophysical Research*, 97, 17503-17529.

CAMPOS, A., MORENO, H., MUÑOZ, J., ANTINAO, J., CLAYTON, J., MARTIN, M. 1998. *Área de Futrono-Lago Ranco, Región de los Lagos*. Servicio Nacional de Geología y Minería,

- Mapas Geológicos 8, 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.
- CANUTI P., CASAGLI N., CATANI F., FALORNI G. 2002. Modeling of the Guagua Pichincha volcano (Ecuador) lahars. *Physics and Chemistry of the Earth*, 27(36), 1587-1599.
- CARRASCO, J.F., OSORIO, R., CASASSA, G. 2008. Secular trend of the equilibrium-line altitude on the western side of the southern Andes, derived from radiosonde and surface observations. *Journal of Glaciology*, 54, 186, 538-550.
- CASASSA, G., RODRÍGUEZ, J.L., LORIAUX, T. In press. A new glacier inventory for the Southern Patagonia Icefield and areal changes 1986-2000. In *Global Land Ice Measurements from Space (GLIMS)*, Eds. Kargel, J.S., Leonard, G.J., Bishop, M.P., Kääb, A., Raup, B.H., Springer Praxis Books, Geophysical Sciences, 810 p., New York, ISBN 978-3-540-79817-0.
- CASASSA, G., ACUÑA, C., ZAMORA, R., SCHLIERMANN, E., RIVERA, A. Ice thickness and glacier retreat at Villarrica Volcano. In Lara, L.E. and J. Clavero, Eds., *Villarrica Volcano (39.5° S), Southern Andes, Chile*. Santiago, 2004, *SERNAGEOMIN Boletín* 61, 53-60.
- CASASSA, G. AND RIVERA, A. 1998. Digital radio-echo sounding at Tyndall Glacier, Patagonia. *Anales Instituto Patagonia, Serie Cs. Nat. (Chile)*, 26, 129-135.
- CASTRUCCIO, A. 2008. Comparación y modelación numérica de lahares calientes en Volcán Calbuco y lahares fríos en el Volcán Villarrica, Andes del Sur. Tesis de Magister en Ciencias Mención Geología, Universidad de Chile, Santiago.
- CITTERIO, M. 2009. *GlacioBasis Manual*. Revision 1 (3rd November 2009), 70p.
- CITTERIO, M. 2011. Design and performance of the GEUS AWS. Workshop on the use of automatic measuring systems on glaciers. Extended abstracts and recommendations. IASC Workshop, 23-26 March 2011. Pontresina (Switzerland), Workshop Proceedings, Institute for Marine and Atmospheric Research, Utrecht University, the Netherlands, p. 22-26.
- CLAPPERTON, C. 1993. *Quaternary geology and geomorphology of South America*. Elsevier Science Publishers, 779 p., Amsterdam.
- CLAYTON, J.D., CLAPPERTON, C.M., ANTINAO, J.L. 1997. Las glaciaciones pleistocenas en la Cuenca del lago Villarrica, Andes del Sur. *Actas VIII Congreso Geológico Chileno*, Vol 1, p. 307-311.
- CUFFEY, K.M. AND PATERSON, W.S.B. 2010. *The physics of glaciers*. Fourth Edition, Butterworth-Heinemann, Oxford, UK.
- DEMETS, C., GORDON, R., ARGUS, D., STEIN, S. 1994. Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions. *Geophysical Research Letters* 21, 2191-2194.

DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS. 2009. Estrategia Nacional de Glaciares. S.I.T. N°205. Santiago.

DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS. 2012. Plan de acción **para la conservación de glaciares ante el cambio climático**. Informe final, vol. 2. Comitato Ev-K2-CNR. S.I.T. N°306. Santiago.

ECHEGARAY, J. 1994. El depósito de pómez pliniana del grupo volcánico Mocho-Choshuenco, Andes del Sur (40°S), Chile. Congreso Geológico Chileno, 7. Concepción, 17-21 Octubre 1994.

ECHEGARAY, J. 2004. Evolución geológica y geoquímica del centro volcánico Mocho-Choshuenco, Andes del Sur, 40°S. Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias Mención Geología y al Título Profesional de Geólogo, Universidad de Chile. Santiago.

EDWARDS, B., Karson, J., Wysocki, R., Lev, E., Bindeman, I., Kueppers, U. Insights on lava-ice/snow interactions from large-scale basaltic melt experiments. 2013. *Geology*, Geological Society of America, doi: 10.1130/G34305.1.

ESCOBAR, I. Comportamiento de la precipitación y temperatura en la zona de los lagos de Chile y su relación con el retroceso de glaciares. 2007. Tesis de título de Meteorólogo, Universidad de Valparaíso. Valparaíso.

FUENZALIDA, H., 1965. Clima de Chile. Geografía Económica de Chile, Corporación de Fomento CORFO, 98-152, Santiago.

GONZÁLEZ-BONORINO, F. 1970. Series metamórficas del basamento cristalino de la Cordillera de la Costa, Chile Central. Universidad de Chile, Departamento de Geología, Publicación 37, 80 p., Santiago.

GONZÁLEZ-FERRÁN, O. 1995. Volcanes de Chile. Instituto Geográfico Militar.

HAEBERLI, W., MAISCH, M., PAUL, F. Mountain glaciers in global climate-related observation networks. *WMO Bulletin*, 51/1, 18–25, 2002.

HUBBARD, B., SHERIDAN, M., CARRASCO, G., DÍAZ, R., RODRÍGUEZ, S., 2007. Comparative lahar hazard mapping at volcan Citlaltepēt, Mexico using SRTM, ASTER and DTED-1 digital topographic data. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 160 (1-2), 99-124.

HUGGEL, C., KÄÄB, A., HAEBERLI, W., KRUMMENACHER, B. 2003. Regional-scale GIS-models for assessment of hazards from glacier lake outbursts: evaluation and application in the Swiss Alps. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3, 647-662.

HUGGEL, C., CEBALLOS, J.L., PULGARÍN, B., RAMÍREZ, J., THROURET, J.-C. 2007. Review and reassessment of hazards owing to volcano–glacier interactions in Colombia. *Annals of Glaciology*, 45, 128-136.

ILLIES, H. 1960. Geologie der Gegend von Valdivia (Chile). Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie Abhandlungen 111, 30-110, Stuttgart.

ILLIES, H. 1970. Geología de los alrededores de Valdivia y volcanismo y tectónica en márgenes del Pacífico de Chile meridional. Universidad Austral, Instituto de Geología y Geografía, 64 p., Valdivia.

KELLER, K., CASASSA, G., RIVERA, A., FORSBERG, R., GUNDESTRUP, N. 2007. Airborne laser altimetry survey of Glaciar Tyndall, Patagonia. *Global and Planetary Change*, 59, 1-4, 101-125.

KONYA, K. AND MATSUMOTO, T. 2010. Influence of weather conditions and spatial variability on glacier surface melt in Chilean Patagonia. *Theor. Appl. Climatol.*, 102: 139-149, DOI 10.1007/s00704-009-0248-0.

LARA, L.E., RODRÍGUEZ, C., MORENO, H., PÉREZ DE ARCE, C. 2001. Geocronología K-Ar y geoquímica del volcanismo plioceno superior-pleistoceno de los Andes del Sur (39°-42°S). *Revista Geológica de Chile*, 28 (1), 67-90.

LARA, L.E. 2004. Geología del volcán Lanín, Región de La Araucanía, Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, 87, 18 p., 1 mapa escala 1:50.000, Santiago.

LARA, L.E., MORENO, H. 2004. Geología del área Liquiñe-Neltume. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 83: 23 p., 1 mapa escala 1:50.000, Santiago.

LARA, L.E., FOLGUERA, A. 2006. The Pliocene to Quaternary narrowing of the Southern Andean volcanic arc between 37° and 41°S latitude. In *Evolution of an Andean margin: A tectonic and magmatic view from the Andes to the Neuquen Basin (35°-39°S lat)* (Kay, S.M.; Ramos, V.A.; editors), *Geological Society of America Special Paper* 407: 299-315.

LARA, L.E., MORENO, H. 2006. Geología del complejo volcánico Puyehue-Cordón Caulle, Región de Los Lagos. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 99, 26 p., 1 mapa escala 1:50.000, Santiago.

LESCINSKY, D., FINK, J. 2000. Lava and ice interaction at stratovolcanoes: use of characteristic features to determine past glacial events and future volcanic hazards. *Journal of Geophysical Research*, 105, 23.711-23.726.

LÓPEZ-ESCOBAR, L., CEMBRANO, J., MORENO, H. 1995. Geochemistry and tectonics of the Chilean Southern Andes basaltic Quaternary volcanism (37°-46°S). *Revista Geológica de Chile* 22 (2): 219-234.

LOWELL, T.V., HEUSSER, C.J., ANDERSEN, B.G., MORENO, P.I., HAUSER, A., HEUSSER, L.E., SCHLUCHTER, C., MARCHANT, D.R., DENTON, G.H. 1995. Interhemispheric

correlation of late Pleistocene glacial events. *Science*, 269, 1541-1549.

MAJOR, J. AND NEWHALL, C. 1989. Snow and ice perturbation during historical volcanic eruptions and the formation of lahars and floods. *Bull. of Volcanol.*, 52, 1-27.

MORENO, H. 1993. **Geología y evaluación del riesgo volcánico, Regiones IX y X, 39° 25' S.** SERNAGEOMIN, Santiago.

MORENO, H. Y LARA, L. 2007. Geología del complejo volcánico Mocho-Choshuenco. Región de los Ríos. Carta Geológica de Chile, serie Geológica Básica. No. 107. Escala 1:50.000. Santiago, SERNAGEOMIN.

MORENO, H. Y CLAVERO, J. 2006. Geología del volcán Villarrica, Región de la Araucanía. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 98, 35 p., 1 mapa escala 1:50.000. Santiago.

MORENO, H.; NARANJO, J.A. 2006. Peligros del Complejo Volcánico Mocho-Choshuenco, Región de Los Lagos. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Ambiental 9, 1 mapa escala 1:50.000, Santiago.

MUNIZAGA, F., HERVÉ, F., DRAKE, R., PANKHURST, R., BROOK, M. 1988. Geochronology of the Lake region of South Central Chile (39°-42°S): Preliminary results. *Journal of South American Earth Sciences* 1 (3), 309-316.

NARANJO, J.A., POLANCO, E., LARA, L., MORENO, H., STERN, C.R. 2001. Holocene tephra-fall deposits of the southern and austral Andes Volcanic Zones (33-54°S): eruption recurrence. Simposio Sudamericano de Geología Isotópica No.3. Servicio Nacional de Geología y Minería-Departamento Geología, Universidad de Chile, Extended Abstracts, 407-408. Pucón.

NARANJO, J.A. Y MORENO, H. 2005. Geología del volcán Llaima, Región de la Araucanía. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, 88, 33 p., Santiago.

NARUSE, R., PEÑA, H., ANIYA, M., INOUE, J. 1987. Flow and surface structure of Glaciar Tyndall, the Southern Patagonia Icefield. *Bull. Glacier Res.*, 4, 133-140.

NORDIN, C.F., AND DEMPSTER, G.R. 1963. Vertical distribution of velocity and suspended sediment, Middle Rio Grande, New Mexico, U.S. Geol. Surv. Prof. Pap., 462-B.

OERLEMANS, J. 2010. The Microclimate of Valley Glacier. Igitur, Utrecht Publishing & Archiving Services, Universiteitsbibliotheek Utrecht, 138 p.

PÉREZ, S. 2005. Volcanismo explosivo postglacial del complejo volcánico Mocho-Choshuenco, Andes del Sur (49°S). Memoria de título (inédito), Universidad de Concepción, Facultad de Ciencias Químicas, Departamento Ciencias de la Tierra, 105 p. Chile.

- PETIT-BREUILH, M.E. 2004. La historia eruptiva de los volcanes hispanoamericanos (siglos XVI al XX): El modelo chileno. Servicio de Publicaciones del Excelentísimo Cabildo Insular de Lanzarote, Serie Casa de los Volcanes 8, 431 p., Huelva.
- PIERSON, T.C. 1981. Dominant particle support mechanisms in debris flows at Mt. Thomas, New Zealand, and implications for flow mobility. *Sedimentology*, 28, 49–60.
- PIERSON, T.C. AND SCOTT, K. 1985. Downstream dilution of a lahar transition From debris flow to hyperconcentrated streamflow. *Water Resources Research*, 21(10), 1511-1524.
- PIERSON, T.C., JANDA, R.J., THOURET, J.-C., BORRERO, C.A. 1990. Perturbation and melting of snow and ice by the 13 November 1985 eruption of Nevado del Ruiz, Colombia, and consequent mobilization, flow and deposition of lahars. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 41, 17-66.
- POPOVNIN, V., DANILOVA, T., PETRAKOV, D. 1999. A pioneer mass balance estimate for a Patagonian glacier: Glaciar De los Tres, Argentina. *Global and Planetary Change*, 22, 255–267.
- QIAN, Y., YANG, W., ZHAO, W., CHENG, X., ZHANG, L., XU, W. 1980. Basic characteristics of flow with hyperconcentration of sediment. *Proceedings of the International Symposium on River Sedimentation*, 175-184, Chinese Society Hydraulic Engineering, Beijing, China.
- RABASSA, J., EVENSON, E., CLINCH, J., SCLIEDER, G., ZEITLER, P., STEPHENS, G. 1990. Geología del Cuaternario del valle del río Malleo, Provincia del Neuquén. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 45(1-2), 55-68.
- RAPELA, C., PANKHURST, R. 1992. The granites of northern Patagonia and the Gastre Fault System in relation to the breakup of Gondwana. In *Magmatism and causes of continental break-up* (Storey, B.; Alabaster, T.; Pankhurst, R.; editors). Geological Society, Special Publication 68, 209-220.
- RIGNOT, E., RIVERA, A., CASASSA, G. 2003. Contribution of the Patagonia icefields of South America to global sea level rise. *Science*, 302, 434-437.
- RIVERA, A., BOWN, F., MELLA, R., WENDT, J., CASASSA, G., ACUÑA, C., RIGNOT, E., CLAVERO, J., BROCK, B. 2006. Ice volumetric changes on active volcanoes in southern Chile. *Annals of Glaciology*, 43, 111-122.
- RIVERA, A., BENHAM, T., CASASSA, G., BAMBER, J., DOWDESWELL, J. 2007. Ice elevation and areal changes of glaciers from the Northern Patagonia Icefield, Chile. *Global and Planetary Change*, 59(1-4), 126-137.
- RIVERA, A., BOWN, F., CARRIÓN, D., ZENTENO, P. 2012. Glacier responses to recent

volcanic activity in Southern Chile. *Environ. Res. Lett.* 7, doi:10.1088/1748-9326/7/1/014036.

RODINE, J.D., 1974. Analysis of mobilization of debris flows, 226 p., Ph.D. thesis, Stanford Univ., Stanford, Calif.

RODRÍGUEZ, C., PÉREZ, Y., MORENO, H., CLAYTON, J., ANTINAO, J., DUHART, P., MARTIN, M. 1999. Área de Panguipulli-Riñihue, Región de Los Lagos. Servicio Nacional de Geología y Minería, Mapas Geológicos 10, 1 mapa escala 1:100.000.

RODRÍGUEZ, J.L., JOYCE, S., CASASSA, G., BOWN, F., RIVERA, A. 2010. Mass balance of Mocho-Choshuenco glacier, Southern Chile, in the period 2003-2010. II PAGES International Symposium "Reconstructing Climate Variations in South America and the Antarctic Peninsula over the last 2000 years", Valdivia, Chile, 27-30 October 2010, Abstract #200.

SCHILLING, S. 1998. LAHARZ: GIS programs for automated mapping of lahar-inundation hazard zones. USGS, Open-File Report 98-638.

SCHILLING, S., VALLANCE, J., MATÍAS, O., HOWELL, M. 2001. Lahar hazards at Agua Volcano, Guatemala: U.S. Geological Survey Open-File Report 01-432.

SCHNEIDER, D., Delgado Granados, H., HUGGEL, C., KÄÄB, C. 2008. Assessing lahars from ice-capped volcanoes using ASTER satellite data, the SRTM DTM and two different flow models: case study on Iztaccíhuatl (Central Mexico). *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 8, 559-571.

SIMONS, D.B. AND RICHARDSON, E.V. 1963. Forms of bed roughness in alluvial channels. *Trans. Am. Soc. Civ. Eng.* 128(1), 284-302.

STEVENS, N., MANVILLE, V., HERON, D. 2002. The sensitivity of a volcanic flow model to digital elevation model accuracy: experiments with digitised map contours and interferometric SAR at Ruapehu and Taranaki volcanoes, New Zealand. *En: Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 160(1-2), 99-124.

THOURET J-C. 1990. Effects of the November 13, 1985 eruption on the snow pack and ice cap of Nevado del Ruiz volcano, Colombia. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 41, 177-201.

THOURET, J.C., RAMÍREZ, J.C., GIBERT-MALENGREAU, B., VARGAS, C.A., NARANJO, J.L., VANDEMEULEBROUCK, J., VALLA, F., FUNK, M. 2007. Volcano-glacier interactions on composite cones and lahar generation: Nevado del Ruiz, Colombia, case study. *Annals of Glaciology*, 45(1), 115-127.

VALLANCE, J. Lahars in *Encyclopedia of Volcanoes*. Academic Press. 2000. P. 601-616.

VARNES, D. J. 1978. Slope movement types and processes, in *Landslides—Analysis and Control*, edited by R. L. Schuster and R. J. Krizek, Spec. Rep. Natl. Res. Council. Transp.

Res. Board, 176, p. 11–33, Natl. Acad. of Sci., Washington, D.C.

VIDAL GORMAZ, F. 1869. Exploración del río Calle-Calle, provincia de Valdivia. Anales de la Universidad de Chile, Tomo XXXII: 34-35.

WILSON, L. AND HEAD, J. 2007. Heat transfer in volcano-ice interactions on Earth. *Annals of Glaciology*, 45(1), 83-86.

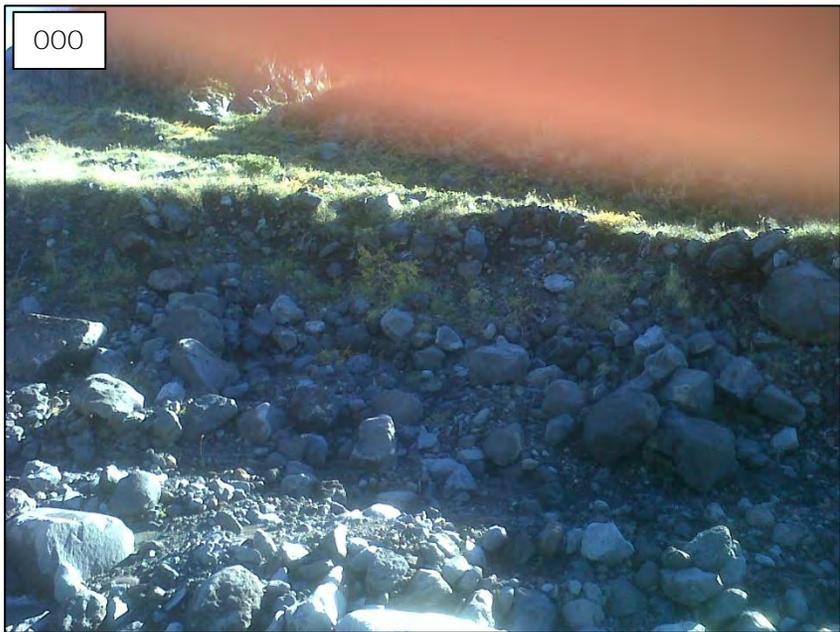
10. ANEXOS

10.1. ESTACIONES DE MUESTREO DE AFLORAMIENTOS DE LAHARES

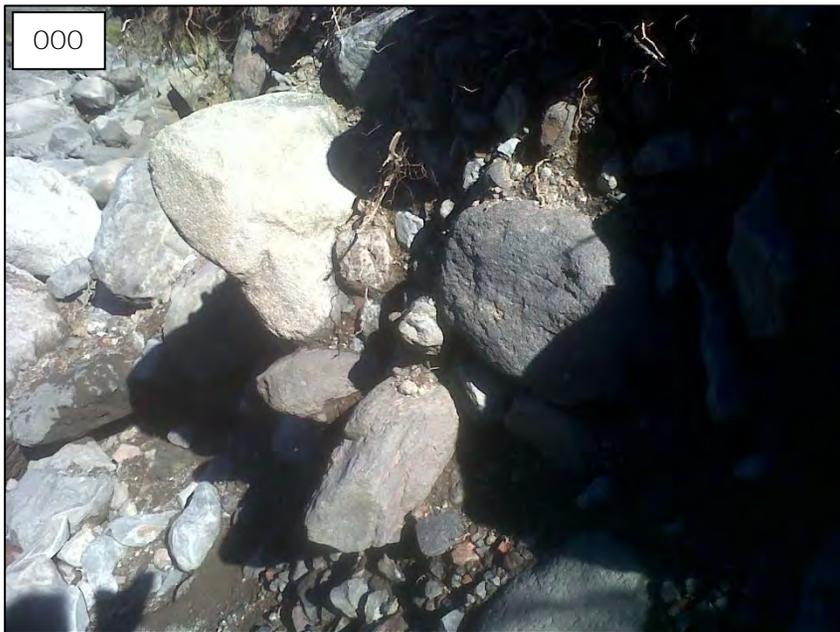
En la Tabla 10.1-A se detallan las coordenadas de las estaciones visitadas. A continuación se detallan las fotos tomadas con indicación del número de estación.

Tabla 10.1-A. Coordenadas de las estaciones de muestreo.

Estación	N (m)	E (m)	Huso
0	5.577.854	757.540	18 S
1	5.577.970	758.077	18 S
2	5.579.100	758.747	18 S
3	5.582.321	745.512	18 S
4	5.581.879	744.863	18 S
5	5.580.871	744.117	18 S
6	5.580.794	744.038	18 S
7	5.578.504	743.622	18 S
8	5.577.236	743.704	18 S
9	5.575.067	748.109	18 S
10	5.575.186	748.116	18 S
11	5.575.356	748.055	18 S
12	5.575.464	748.014	18 S
13	5.586.459	753.325	18 S
14	5.586.267	753.312	18 S
15	5.586.102	753.214	18 S
16	5.587.271	753.164	18 S
17	5.569.735	762.556	18 S
18	5.569.206	762.016	18 S
19	5.568.783	761.725	18 S
20	5.566.284	760.930	18 S
21	5.566.160	760.746	18 S
22	5.566.432	760.513	18 S
23	5.565.192	760.300	18 S
24	5.561.187	758.077	18 S
25	5.563.865	759.075	18 S
26	5.553.424	757.431	18 S
27	5.544.259	755.223	18 S

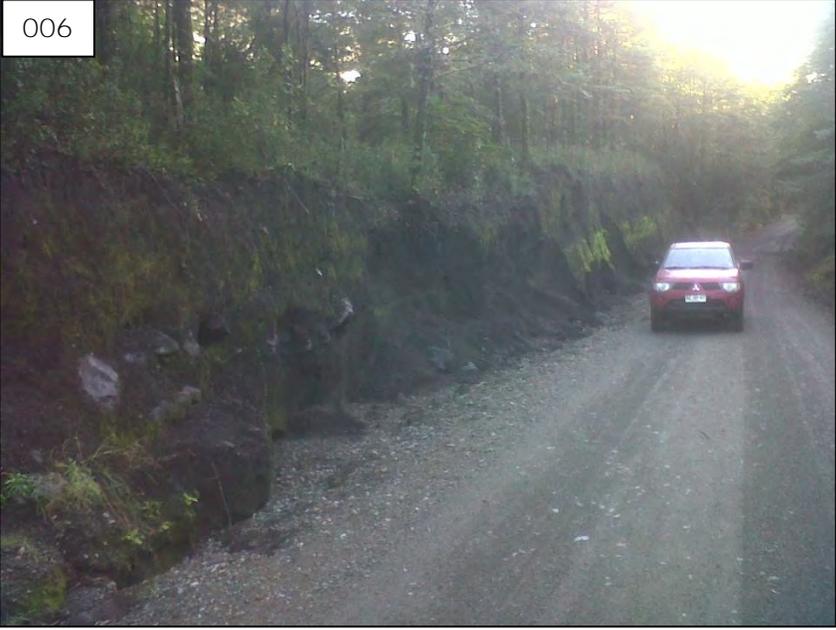




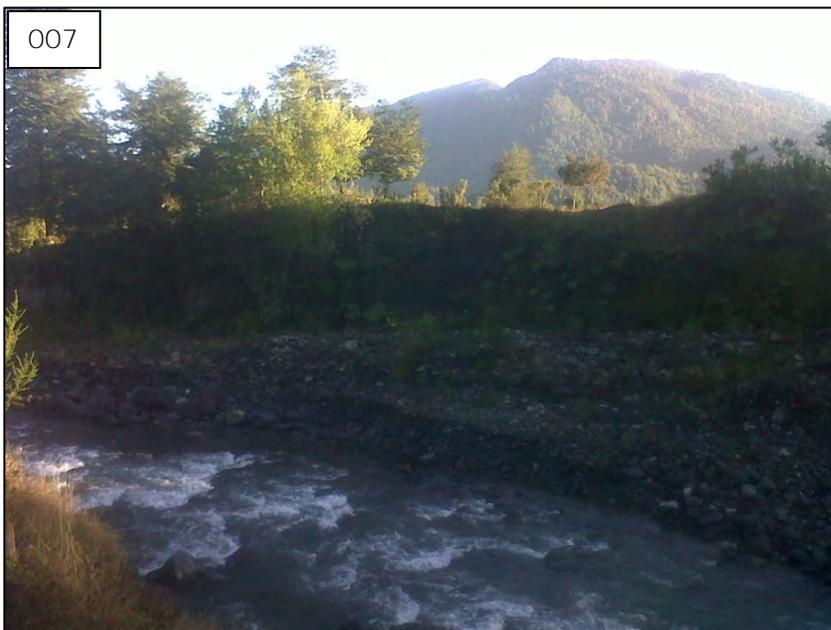








































10.1 ANEXOS DIGITALES (EN CD)

01_GIS Lahares Mocho-Choshuenco

02_Programas de Captura de Datos de Estaciones Meteorológicas y Fluviométrica

03_Datos Fluviométricos y Pluviométricos

Tyndall

Geikie

Cañadón 1

Afluyente glaciar Mocho-Choshuenco

04_Meteorología

Glaciar Bello

Glaciar Yeso

Glaciar Exploradores

Glaciar Tyndall

05_Fotogramas Cámaras Fotográficas Secuenciales

Cámara Norte

Cámara Sur

06_Transmisión de Datos Vía Satelital

Bibliografía

Datos

07_Datos GPS

Glaciar Tyndall

Glaciar Exploradores

Glaciar Bello

Glaciar Yeso

08_Manuales y Notas de las Capacitaciones

Taller Lahares

Taller Iridium

09_Fotos Actividades Terreno

10_ Informe Final en pdf

Fin del Informe Final.